

STAT

Page Denied

Next 1 Page(s) In Document Denied

**DEUTSCHE FORSCHUNGSANSTALT
FÜR LUFTFAHRT E.V.
INSTITUT FÜR STRAHLTRIEBWERKE
PROF. DR. O. LUTZ**

DFL-Bericht Nr. 69

O. Lutz und W. Müller

**Reaktionsenthalpie-Entropie-Tafel für das
stöchiometrische Gemisch Heptan-Luft bis 4000°K.**

**BRAUNSCHWEIG
April 1957**

Inst. S 20/57

DK 536.7
541.22
546.217
547.217.1

Deutsche Forschungsanstalt für Luftfahrt e.V. (DFL)

DFL - Bericht Nr. 69

O. Lutz und W. Müller

Reaktionsenthalpie-Entropie-Tafel
für das stöchiometrische Gemisch
Heptan-Luft bis 4000 °K.

Der Bericht umfaßt:

22 Seiten Text

9 Tafeln und Diagramme

Braunschweig, im April 1957

Institut für Strahltriebwerke der DFL

Der Institutsleiter:

O. Lutz
.....

(Prof. Dr.-Ing. O. Lutz)

Der Bearbeiter:

W. Müller
.....

(Dipl.-Ing. W. Müller)

S 20/57

Inhalt.

1. Einleitung.
2. Reaktionsgleichung und Molverhältnisse.
3. Bestimmungsgleichungen für die Partialdrücke p_{H_2} und p_{NO} .
4. Reaktionsenthalpie, Entropie und Molekulargewicht des Gemisches.
5. Entwurf der i^*,s - Tafel.
6. Dissoziation.
7. Anwendungsbeispiele.
 - 7.1 Isoplane Verbrennung und isentrope Entspannung des Verbrennungsgasgemisches beim Flugzustand $M_{fl} = 4,0$ und $H = 0$ km.
 - 7.2 Isoplane Verbrennung und isentrope Entspannung beim Flugzustand $M_{fl} = 2,0$ und $H = 35$ km.
8. Zusammenfassung.
9. Schrifttum.

Tafeln und Diagramme.

Tafel 1: Reaktionsenthalpie - Interpolationstafel.

Tafel 2: Entropie - Interpolationstafel.

Tafel 3: Molekulargewicht - Interpolationstafel.

Tafel 4: i^*,s - Tafel.

Tafel 5: p,w - Diagramm für $\kappa = 1,4$.

Diagramm 6: p,w - Diagramm zu Beispiel 1 ($M_{fl}^* = 4$, $H = 0$ km).

Diagramm 7: p,w - Diagramm zu Beispiel 2 ($M_{fl}^* = 2$, $H = 35$ km).

Diagramm 8: Verbrennungsisoplane zum Flugzustand $M = 4$, $H = 0$ km.

Diagramm 9: Verbrennungsisoplane zum Flugzustand $M = 2$, $H = 35$ km.

- 1 -

1. Einleitung.

In früheren Berichten [1,2] wurden für einige Reaktionsgemische, wie sie in Raketentriebwerken Verwendung finden, i^*,s - Tafeln entworfen. Darüber hinaus interessieren jedoch auch Gemische, die zur Verbrennung in Staustahltriebwerken geeignet sind, d.h. Gemische, deren Sauerstoffträgerkomponente die Luft ist. In diesem Bericht wird für das stöchiometrische Gemisch Heptan-Luft eine i^*,s - Tafel entwickelt, deren Druckbereich - 0,01 bis 100 at - die Grenzen des Flugbereiches von Staustahltriebwerken umfaßt.

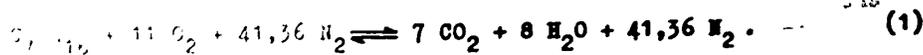
Die einzelnen Gemischpunkte werden auf der Basis der $i^*,\sqrt{}$ - Tafeln berechnet, die nach einem Vorschlag von O. Lutz [3] von H. Reichert [4] erstellt wurden. Dieses Verfahren bringt den Vorteil, ohne Berechnung der Partialdruckverteilung die Werte für Enthalpie, Entropie und Molekulargewicht unter relativ geringem Rechenaufwand bestimmen zu können.

In zwei Zahlenbeispielen sollen die Anwendungsmöglichkeiten der i^*,s - Tafel erläutert werden.

- 2 -

Stöchiometrische Molverhältnisse.

Die stöchiometrische Heptan-Luft Verbrennung gilt die Reaktions-



hierbei ist die übliche Annahme zugrunde gelegt, daß sich die Volumprozentage des Luftsauerstoffes und Luftstickstoffes wie 1:3,76 verhalten, wenn die Volumprozentage der Nebenelemente Argon (Ar) und Kohlendioxyd (CO_2) der Stickstoffkomponente zugeschlagen werden. Das mittlere Molekulargewicht des Gasgemisches N_2 -Ar- CO_2 hat den Wert $M_{N_2} = 28,160$, das mittlere Molekulargewicht der Luft demzufolge den Wert $M = 28,967$ kg/kmol.

Aus (1) ergeben sich die Molverhältnisse zu:

$$n_C/n_H = 0,4375 ; n_N/n_O = 3,76 \text{ und } n_C/n_O = 0,3182 .$$

Das Kohlenstoff-Wasserstoff-Verhältnis n_C/n_H ist bei den verwendeten i^* , Γ -Tafeln - neben dem Gesamtdruck p - Haupttafelparameter, der sich zwischen den Werten 0 und ∞ von Tafel zu Tafel um 0,2 abstuft. Der vorliegende Wert $n_C/n_H = 0,4375$ erfordert dementsprechend eine Interpolation zwischen den Tafelwerten $n_C/n_H = 0,4$ und $n_C/n_H = 0,6$. Mit $n_O = 22$, $n_C = 7$ und $n_H = 16$ wird das als

$$\Gamma = \frac{n_O}{2n_C + n_H/2 + n_O} \quad (2)$$

definierte [3, 4] "Reaktionsverhältnis" $\Gamma = 0,50$, wie es die Definition für genau stöchiometrische Gemische verlangt. (7)

- 3 -

... für die Partialdrücke p_{N_2} und p_{NO} .

Der i^*, s -Tafel für ein Reaktionsgemisch mit den Komponenten Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff allein können die korrigierten Werte für die Reaktionsenthalpie i^* , die Entropie s und das Molekulargewicht M direkt durch Interpolation aus der entsprechenden i^*, \sqrt{T} -Tafelgruppe ermittelt werden. Zur Berücksichtigung weiterer Komponenten sind zusätzliche Überlegungen anzustellen, die im folgenden für den hier interessierenden Fall der Stickstoffkomponente des betrachteten Gemisches spezialisiert sind.

Der Tafeldruck p_T jeder i^*, \sqrt{T} -Tafel ist

$$p_T = p_{O_2} + p_{O} + p_{H_2} + p_{H} + p_{OH} + p_{H_2O} + p_{CO} + p_{CO_2} + p_{C_2} + p_C \quad (3)$$

Der Gesamtdruck p ist um die Partialdrücke der Stickstoffkomponenten N_2 und NO größer als dieser Tafeldruck:

$$p = p_T + p_{N_2} + p_{NO} \quad (4)$$

Während die Molzahlen n_C und n_H unverändert bleiben, vergrößert sich die Sauerstoffmolzahl entsprechend

$$n'_O = n_O + p_{NO} \quad (5)$$

Zusätzlich müssen folgende Beziehungen erfüllt sein:

$$n_N = 2p_{N_2} + p_{NO} \quad (6)$$

und für die Gleichgewichtskonstante des Stickstoffs

$$K_{NO} = \frac{p_{NO}}{\sqrt{p_{N_2}} \cdot \sqrt{p_{O_2}}} \quad (7)$$

1) Der Partialdruck des atomaren Stickstoffes p_N ist in dem in der i^*, s -Tafel umfaßten Druck- und Temperaturbereich vernachlässigbar klein.

- 4 -

Da p_{NO} meist klein gegenüber p_{N_2} ist, kann als erste Näherung entsprechend (6) für den Partialdruck des Stickstoffs

$$p_{N_2} = \frac{1}{2} n_0 \frac{n_N}{n_O} \quad (8)$$

angesetzt werden, wenn der Unterschied zwischen n_0' und n_0 unberücksichtigt bleibt. Für das vorliegende Verhältnis $n_N/n_0 = 3,76$ ist also

$$p_{N_2} \approx 1,88 n_0 .$$

Der Partialdruck des Stickoxyds folgt dann aus (7) zu

$$p_{NO} = \sqrt{p_{N_2}} \sqrt{p_{O_2}} K_{NO} . \quad (7a)$$

Stellt sich heraus, daß p_{NO} - verglichen mit p_{N_2} - nicht vernachlässigbar klein ist, muß ein kleinerer Wert für das Reaktionsverhältnis Γ aus der i^* , Γ - Tafel entnommen werden, d.h. der Punkt muß so weit nach links verschoben werden, bis n_0 um den Betrag p_{NO} abgenommen hat und die Summe von beiden Beträgen entsprechend (5) den alten Wert (= n_0') ergibt. Den korrigierten Wert für p_{N_2} erhält man - soweit erforderlich - durch Koppelung der beiden Gleichungen (6) und (7) aus

$$\sqrt{p_{N_2}} = \sqrt{\left(\frac{K_{NO} \sqrt{p_{O_2}'}}{4}\right)^2 + 1,88 n_0'} - \frac{K_{NO} \sqrt{p_{O_2}'}}{4} , \quad (9)$$

den endgültigen Wert für p_{NO} aus (7a). Die Schlüsselwerte n_0 und p_{O_2} sind in den i^* , Γ - Tafeln als Hilfskurven über Γ mit T als Parameter aufgetragen.

- 5 -

4. Reaktionsenthalpie, Entropie und Molekulargewicht des Gemisches.

Über Γ , das in den meisten Fällen mit dem Reaktionsverhältnis $\Gamma = 0,5$ des betrachteten Heptan-Luft Gemisches genau genug übereinstimmt, werden aus den Tafelgruppen mit dem Molverhältnis $n_C/n_H = 0,4$ und $n_C/n_H = 0,6$ in Abhängigkeit vom Tafeldruck p_T und der Temperatur T die Werte für i^* , s und M entnommen, die im folgenden mit dem Index "T" gekennzeichnet werden. Für das gesamte Gemisch sind dann das Molekulargewicht, die Reaktionsenthalpie und die Entropie entsprechend der Summenformel für Gasgemische gegeben durch

$$M = \frac{p_T M_T + p_{N_2} M_{N_2} + p_{NO} M_{NO}}{p}, \quad (10)$$

$$i^* = \frac{p_T M_T i_T^* + p_{N_2} M_{N_2} i_{N_2}^* + p_{NO} M_{NO} i_{NO}^*}{p M} \quad (11)$$

$$\text{und} \quad s = \frac{p_T M_T s_T + p_{N_2} M_{N_2} (s_{N_2}^{\circ} - R \ln p_{N_2}) + p_{NO} M_{NO} (s_{NO}^{\circ} - R \ln p_{NO})}{p M} \quad (12)$$

Dabei ist p der Gesamtdruck des Gemisches nach (4). Die Molekulargewichte der beiden Stickstoffkomponenten haben die Werte $M_{N_2} = 28,160$ und $M_{NO} = 30,080$.

- 6 -

5. Entwurf der i^*, s - Tafel.

Es werden zunächst Interpolationstabeln (Tafel 1-3 des Anhangs) aufgestellt, in denen mit der Temperatur als Parameter das Molekulargewicht M , die Reaktionsenthalpie i^* und die Entropie s in Abhängigkeit vom Gesamtdruck p aufgetragen sind. Für M , i^* und s wird ein linearer Maßstab, für p ein logarithmischer Maßstab verwendet.

Aus den $i^*, \sqrt{}$ - Tafeln werden auf einer Isotherme die Größen i_T^* , M_T und s_T , sowie die Schlüsselwerte p_{O_2} und n_0 entnommen. Dies geschieht für die vier Tafeldrücke $p_T = 0,1; 1; 10$ und 100 at der beiden Gruppen $n_C/n_H = 0,4$ und $n_C/n_H = 0,6$ auf der Ordinate $\sqrt{ } = 0,50$, so daß insgesamt 8 Tafeln herangezogen werden müssen. Der Gesamtdruck p jedes Gemischpunktes und die zugehörigen Werte M , i^* und s lassen sich, wie beschrieben, aus den Gleichungen (4), (10) und (12) ermitteln. Man erhält je zwei Interpolationstabeln, da jeder Zustandspunkt für die gleiche Temperatur T einmal beim Molverhältnis $n_C/n_H = 0,4$ und einmal bei $n_C/n_H = 0,6$ auftritt. Die graphische lineare Interpolation nach $n_C/n_H = 0,4375$ liefert die endgültigen drei Interpolationstabeln $p - i^*$, $p - s$ und $p - M$, die die Basis für die zu konstruierende i^*, s - Tafel bilden.

Die Isothermen der i^*, s - Tafel findet man direkt als Verbindung der Punkte, die sich aus den bei $p = \text{const}$ auf der entsprechenden Isotherme in der p, i^* - und p, s - Interpolationstafel (Tafel 1 und 2 des Anhangs) abgelesenen i^* - und s - Werte in einem i^*, s - Koordinatensystem ergeben. Die Isobaren sind die Verbindungen der auf verschiedenen Isothermen liegenden Punkte gleichen Druckes. Die Linien gleichen Molekulargewichts ergeben sich aus der p, M - Tafel und p, s - Tafel: die auf der Ordinate $M = \text{const}$ in der p, M - Tafel auf den einzelnen Isothermen abgelesenen Werte für p werden in die p, s - Tafel übernommen und vermitteln dort auf den gleichen Iso-

- 7 -

men die entsprechenden Entropie - Werte, die auf den Isothermen in
1. i^*,s - Tafel eingezeichnet und untereinander verbunden die gesuchten
Linien $M = \text{const}$ ergeben. Entsprechend können auch die aus der p, λ - Tafel
ermittelten Druckwerte in die p, i^* - Tafel übernommen und die Enthalpie -
Werte auf den jeweiligen Isothermen der i^*,s - Tafel eingezeichnet werden.

- 8 -

6. Dissoziation.

Der Umfang der Dissoziation des Gasgemisches ist in der i^*,s - Tafel an der Neigung der Isothermen gegenüber der Horizontalen erkennbar. Im Tafelbereich, in dem die Isothermen vollständig horizontal verlaufen, ist keine Dissoziation vorhanden. Deutlich sichtbar wird diese im unteren Bereich der i^*,s - Tafel ab 1600°K . Die Dissoziationsgrenzen sind weiterhin gekennzeichnet durch die Extremwerte des mittleren Molekulargewichts: unten durch das maximale, oben durch das minimale Molekulargewicht. Wenn man berücksichtigt, daß im unteren dissoziationsfreien Tafelbereich mit der Reaktionsgleichung (1) das Gasgemisch die Zusammensetzung $7\text{CO}_2 + 8\text{H}_2\text{O} + 41,36\text{N}_2$ hat, erhält man aus der üblichen Summenformel

$$M = \frac{\sum n_i M_i}{\sum n_i} \quad (13)$$

$M_{\text{max}} = 28,681\text{ kg/kmol}$. Bei völliger Dissoziation der Verbrennungsgase entsprechend der Struktur $22\text{O} + 16\text{H} + 7\text{C} + 82,72\text{N}$ folgt aus (13) $M_{\text{min}} = 12,660\text{ kg/kmol}$. In der vorliegenden i^*,s - Tafel wird diese obere Grenze bei weitem nicht erreicht, lediglich die schwach erkennbaren Wendepunkte der Isothermen weisen darauf hin, daß sich auch im obersten Bereich das Zustandsbild des idealen Gases mit dem Dissoziationsgrad Null und horizontalen Isothermen anschließen wird.

Im einzelnen können über den Dissoziationsumfang folgende Ergebnisse festgehalten werden:

1. Die Dissoziation nimmt mit wachsender Temperatur zu, beginnend bei etwa 1600°K . Eine Abnahme der Dissoziation ist bis 4000°K und im Druckbereich 10^{-2} bis 10^2 at noch nicht erkennbar.
2. Die Dissoziation nimmt bei gleichbleibender Temperatur mit wachsendem Druck ab. So ist z.B. bei 2200°K im Druckbereich 10^{-2}

- 9 -

bis 10^{-1} at das Gasgemisch recht stark dissoziiert, während es bei 100 at noch keine Neigung zur Dissoziation zeigt. Bei einem Druck von 10^{-2} at beginnt die Dissoziation schon bei 1600°K , bei einem Druck von 10^2 at liegt der Dissoziationsbeginn dagegen erst bei etwa 2300°K .

3. Die Verschiebung des Dissoziationsbeginns mit wachsendem Druck zu höheren Temperaturen hin ist unterschiedlich. So beträgt bei einer Druckerhöhung von 10^{-2} at auf 1 at die Temperaturzunahme 100° , bei einer Erhöhung des Druckes um das gleiche Verhältnis, von 1 at auf 100 at, dagegen 600° .

- 10 -

Beispiel 1.

Für zwei Extremfälle des Flugbereichs von Staustrahltriebwerken soll die Anwendung der entworfenen i^*, s - Tafel gezeigt werden:

1. In Seehöhe - $H = 0$ km, d.h. bei maximalem Außendruck und größter Luftdichte - bei Flug-Machzahl $M = 4$,
2. in 35 km Höhe - d.h. bei minimalem Außendruck und sehr kleiner Luftdichte - bei $M = 2$.

7.1 Inoplane Verbrennung und isentrope Entspannung des Verbrennungs-
gasgemisches beim Flugzustand $M_{f1} = 4,0$ und $H = 0$ km.

7.1.1 Adiabatischer Aufstau und Verbrennungsisoplane.

Nach der "Normalatmosphäre" (DIN 5450) sind folgende Zustandsdaten der Luft verwendet worden:

$$\text{Druck } p = 1,0332 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\text{Temperatur } T = 288 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$\text{und Dichte } \rho = 0,125 \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4.$$

Der Temperatur $T = 288 \text{ }^\circ\text{K}$ entspricht die Schallgeschwindigkeit $w_s = 340 \text{ m/s}$.

In einer früheren Arbeit [5] wurde ein dimensionsloses ρ, M - Diagramm für Luft entworfen. Das Diagramm ist als Tafel 5 im Anhang diesem Bericht beigelegt. Aus ihm lassen sich für $M_{f1} = 4,0$ die dimensionslosen Werte für die Flugeschwindigkeit und den Flugdruck entnehmen. Benutzt man die in [5] angegebenen Gleichungen, so erhält man:

$$\frac{M_{f1}}{M} = 2,138$$

$$\text{und } \frac{p_{f1}}{p} = 0,00658.$$

Der Absolutwert der Flugeschwindigkeit beträgt $w_{f1} = 1360 \text{ m/s}$; der

- 11 -

Der dimensionslos gemachte Flugdruck p_H vermittelt $p_H = 1,133$ mit dem Wert $p_0 = 157$ at. Nimmt man im Diffusor des p_H -Diagramms den geraden Verdichtungsstoß beim Aufstau an, so erhält man mit Hilfe des p, μ_0 -Diagramms einen reduzierten Bahndruck $p_0' = 0,139$ entsprechend $p_0' = 21,8$ at [5].¹⁾

Die Ruheenthalpie des Verbrennungsgasgemisches berechnet sich für den vorgegebenen Flugzustand wie folgt: bei der Flugtemperatur 288°K beträgt die Reaktionsenthalpie der Luft $i_{288}^* = -2,4$ kcal/kg. Dieser Wert wird um den Betrag erhöht, der dem Aufstau der Luft von der Geschwindigkeit w_{f1} auf $w = 0$ entspricht:

$$i_0'^* = i_{288}^* + \frac{w_{f1}^2}{2g}, \quad (14)$$

$$i_0'^* = 218,4 \text{ kcal/kg}.$$

Unter Berücksichtigung der Bildungsenthalpie des Heptan-Luft Gemisches erhält man die Ruheenthalpie bezogen auf 1 kg Heptan-Luft

$$i_0^* = \frac{G_L}{G_{HL}} i_0'^* + (i_B)_{HL}, \quad (15)$$

$$i_0^* = 171,8 \text{ kcal/kg}.$$

Die in den Diffusor eintretende Luft soll auf die Geschwindigkeit $w_1 = 80$ m/s aufgestaut werden. Über die Werte $\mu_0 = 0,126$ ²⁾ und $p_0 = 0,991$ aus dem p, μ_0 -Diagramm erhält man den entsprechenden Druck

1) Die Annahme des geraden Verdichtungsstoßes ist eine bewusste Vereinfachung des Aufstauvorganges, der tatsächlich eine Folge von schrägen Verdichtungsstößen ist.

2) Die Geschwindigkeiten sind im p, μ_0 -Diagramm mit der kritischen Geschwindigkeit dimensionslos gemacht, deren Wert durch

$$w_{\text{krit}} = \frac{w_{f1}}{\mu_{f1}} = 636 \text{ m/s gegeben ist.}$$

- 12 -

$p_1 = 21,4 \text{ at}$. Die weiteren Zustandsgrößen im Punkt 1 ergeben sich wie folgt: die Temperatur aus

$$T_1 = T_{f1} + \frac{w_{f1}^2 - w_1^2}{2g c_p} \quad [^{\circ}\text{K}] \quad (16)$$

zu $T_1 = 1142 \text{ }^{\circ}\text{K}$, die Reaktionsenthalpie aus

$$i_1^* = i_0^* - \frac{w_1^2}{2g} \quad [\text{kcal/kg}] \quad (17)$$

zu $i_1^* = 171,0 \text{ kcal/kg}$, das Molekulargewicht aus der i^*, s - Tafel zu

$M_1 = 28,964 \text{ kg/kmol}$ und die Dichte aus

$$\rho_1 = \frac{p_1 M_1}{R T_1 g} \quad [\text{kgs}^2/\text{m}^4] \quad (18)$$

zu $\rho_1 = 0,6526 \text{ kgs}^2/\text{m}^4$.

Die Verbrennung des Heptan-Luft Gemisches erfolgt "isoplan", d.h. in einem Brennraum mit konstantem Querschnitt. Nach der Kontinuitätsgleichung

$$\rho w f = \text{const} \quad (19)$$

muß demnach für die Verbrennungsisoplane in jedem Punkt des Verbrennungsablaufes die Bedingung

$$\rho w = \text{const} \quad (19a)$$

erfüllt sein. Aus der Euler'schen Strömungsgleichung

$$\rho w = - \frac{\partial p}{\partial w} \quad (20)$$

ergibt sich weiterhin für die Isoplane ein linearer Druckabfall. Bezeichnet - wie oben - der Index 1 den Brennkammereintritt und der Index 2 den Brennkammeraustritt, so gilt nach (19a)

$$\rho_1 w_1 = \rho_2 w_2 \quad (19b)$$

Mit $\rho_1 = 0,6526 \text{ kgs}^2/\text{m}^4$ und $w_1 = 80 \text{ m/s}$ hat die Stromdichte nach der

- 13 -

Verbrennung den Wert $\rho_2 w_2 = 52,208 \text{ kg/m}^3$.

Die Ermittlung der Isoplane geschieht durch Vorgabe verschiedener Brennkammeraustrittsgeschwindigkeiten w_2 , wodurch einmal die Dichte ρ_2 festliegt und zum anderen die Reaktionsenthalpie nach der Verbrennung gegeben ist:

$$i_2^* = i_0^* - \frac{w_2^2}{2g} \quad (17a)$$

Geschwindigkeit, Enthalpie, Dichte und Druck nach der Verbrennung:

w_2	200	300	500	800	900	1000	1100	1200
ρ_2	0,2610	0,1740	0,1044	0,065	0,0580	0,0522	0,0475	0,0435
i_2^*	167	161	142	95	75	52	27	0
p_2	21,4	13,8	8,1	4,9	4,2	3,7	3,3	3,0

w [m/s], ρ [kg s²/m⁴], i^* [kcal/kg], p [at].

Auf der jeweiligen Horizontalen i_2^* wird in der i^*,s - Tafel durch Probieren der Zustandspunkt bestimmt, dessen Komponenten p_2 , T_2 und w_2 die geforderte Dichte ρ_2 vermitteln (vgl. obige Tabelle). Die Verbindungslinie aller auf diese Weise gefundenen Punkte ist die Isoplane der Verbrennung. Da eine Verbrennung nur unter Entropiezunahme erfolgen kann, ist im Diagramm 8 der Isoplanenast unterhalb des Punktes 2 nicht existent. Die zum Punkt 2 gehörige Geschwindigkeit $w_2 = 955 \text{ m/s}$ ist somit die in vorliegendem Fall maximal erreichbare Geschwindigkeit am Brennkammeraustritt. Verfolgt man die Senkrechte im Punkt 2 - $p_2 = 3,8 \text{ at}$ - bis zum Schnitt mit der Horizontalen $i_0^* = 171,8 \text{ kcal/kg}$, so findet man den reduzierten Kesseldruck $p_0^* = 6,9 \text{ at}$ - Punkt 3 -, d.h. der gasdynamische Druckverlust in der Brennkammer beträgt für den Extremfall $w_2 = w_{2,\max}$ $\Delta p = 14,9 \text{ at}$ ($\cong 68 \%$).

- 14 -

im oberen Teil der Isoplane gibt es ebenfalls einen nicht existenten Ast mit der Bedingung $ds < 0$, d.h. die Isoplanengleichung (19b) wird nicht durch beliebige Werte $w_2 > w_1$ erfüllt. Es gibt eine erforderliche Mindestgeschwindigkeit $w_{2,\min}$, um isoplan verbrennen zu können. Lotet man Punkt 1 auf die Isoplane herunter, so wird $i_2^* = 166,3$ kcal/kg und $w_{2,\min} = 215$ m/s.

7.1.2 Wirkliche und eingefrorene Entspannungsisentropie.

Es soll angenommen werden, daß durch maximale Wärmezufuhr die Brennkammeraustrittsgeschwindigkeit den Wert $w_{2,\max} = 955$ m/s erreicht, entsprechend einem Druck $p_2 = 3,8$ at. Wie oben ausgeführt, führt die Reduzierung auf einen neuen Kesselzustand mit dem Druck $p_0'' = 6,9$ at bei $i_0^* = 171,8$ kcal/kg und den Werten $T_0'' = 2664$ °K und $M_0'' = 28,104$ kg/kmol. Von diesem Zustandspunkt aus wird mit Hilfe der i^*,s - Tafel die wirkliche - d.h. die tatsächlichen Gleichgewichtszustände berücksichtigende - Entspannungsisentropie ermittelt und zum Vergleich der "eingefrorenen" Isentropie gegenübergestellt.

In Druck-Intervallen fortschreitend werden für die wirkliche Isentropie im i^*,s - Diagramm Enthalpiedifferenzen abgegriffen und nach der Beziehung

$$w = 91,506 \sqrt{\Delta i^*} \quad [\text{m/s}] \quad (21)$$

in Geschwindigkeiten umgerechnet. Für die "eingefrorene" Isentropie wird die bekannte "Kesselformel"

$$w^2 = \frac{2g\kappa}{\kappa-1} \frac{R \cdot T_0''}{M_0''} \cdot \left[1 - \left(\frac{p}{p_0''} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \quad (22)$$

benutzt. Der Adiabatenexponent κ muß mit Hilfe der Molwärmen aller Gaspartner aus der Partialdruckverteilung im Isentropenausgangspunkt ermittelt werden:

$$\kappa = \frac{\sum p_i \bar{L}_i}{\sum p_i \bar{L}_i - 1,387 \sum p_i} \quad (23)$$

... $\sum p_i \bar{L}_i = 0,9 \text{ at}$ und $T \approx 2700 \text{ }^\circ\text{K}$ - ergibt sich
mit $\kappa = 1,274$.

Die Isentrope und "eingefrorene" Isentrope sind im Diagramm 6 dargestellt.

Die maximale Geschwindigkeit, die der Entspannung auf den Druck $p = 0 \text{ at}$ entspricht, ergibt sich bei der wirklichen Isentrope aus der maximalen Enthalpiedifferenz gegenüber der Ruheenthalpie i_0^* . Bei 0 at und $0 \text{ }^\circ\text{K}$ ist das Verbrennungsgemisch restlos rekombiniert, so daß der Enthalpiewert aus der Gemischzusammensetzung $7 \text{ CO}_2 + 8 \text{ H}_2\text{O} + 41,56 \text{ N}_2$ auf einfache Weise zu $i^* = -768 \text{ kcal/kg}$ berechnet werden kann. Die Enthalpiedifferenz $\Delta i_{\text{max}}^* = 940 \text{ kcal/kg}$ vermittelt die maximale Auströmgeschwindigkeit $w_{\text{max}} = 2406 \text{ m/s}$. Bei der eingefrorenen Isentrope ergibt sich w_{max} aus (22) mit $p = 0$ zu $w_{\text{max}} = 2658 \text{ m/s}$.

Der kritische Zustandspunkt läßt sich für die eingefrorene Isentrope sehr leicht aus den expliziten Beziehungen

$$\frac{p_{\text{krit}}}{p_0} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad [-] \quad (24)$$

und

$$w_{\text{krit}} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa + 1} \frac{T_0 R}{M\sigma}} \quad [\text{m/s}] \quad (25)$$

ermitteln. Für das kritische Druckverhältnis erhält man mit $\kappa = 1,2874$ den Wert $0,5480$, entsprechend dem kritischen Druck $p_{\text{krit}} = 3,78 \text{ at}$. Die kritische Geschwindigkeit wird $w_{\text{krit}} = 942 \text{ m/s}$. Für die wirkliche Isentrope können die kritischen Werte für Druck und Geschwindigkeit nicht

- 16 -

explizit ermittelt werden. Da das Maximum der Mengenstromdichte ρ_w dem kritischen Zustand entspricht - denn nach (20) ist ρ_w dem Druckgradienten $\partial p / \partial w$ proportional, und im Wendepunkt der p, w - Kurve ist der kritische Zustand erreicht - , erhält man aus der Auftragung von ρ_w über w die gesuchten Daten. Im Diagramm 6 ist das Verhältnis w/v , das der Mengenstromdichte ρ_w proportional ist, über w aufgetragen. Das Maximum $w/v = 498 \text{ mkg/m}^3 \text{ s}$ - auf die p, w - Kurve übertragen, vermittelt die Werte $p_{\text{krit}} = 3,8 \text{ at}$ und $w_{\text{krit}} = 955 \text{ m/s}$. Diese Werte stimmen überein mit denen des Endpunktes des existenten Isoplanenastes. Dies bedeutet, daß eine Wärmezufuhr auf der Isoplane über den kritischen Zustand hinaus nicht möglich ist.¹⁾

Für die Abweichung der eingefrorenen von der wirklichen Entspannungs-isentrope können im einzelnen folgende Ergebnisse festgehalten werden (vgl. dazu Diagramm 6) :

1. Im oberen Entspannungsbereich werden die Ausströmgeschwindigkeiten durchweg zu groß ermittelt.
2. Von einem Druck ab, der noch oberhalb des Schallpunktes liegt, werden die Ausströmgeschwindigkeiten nach der eingefrorenen Isentrope zu klein. Der Fehler wächst mit steigendem Entspannungsverhältnis. Beträgt z.B. der Unterschied bei einem Entspannungsverhältnis 1 : 2,5 ($p = 2,76$) 30 m/s bzw. 2,6 %, so wird er bei der Entspannung auf den Außendruck $p_a = 1 \text{ at}$ schon 70 m/s bzw. 4,2 %.
3. Die maximale Ausströmgeschwindigkeit wird um 148 m/s entsprechend 5,3 % zu klein.
4. Der Schallzustand wird zu spät ermittelt; die kritische Geschwindigkeit ist um 1,4 % zu klein.

¹⁾ Vgl. hierzu [5], Abschnitt 3 : "Wärmezufuhr bei zylindrischer Brennkammer".

- 17 -

7.2 Isoplane Verbrennung und isentrope Entspannung beim Flugzustand

$$\underline{M_{fl} = 2,0 \text{ und } H = 35 \text{ km .}}$$

7.2.1 Adiabater Aufstau und Verbrennungsisoplane.

Mit der "Normalatmosphäre" erhält man für die Luft in 35 km Höhe über N.N. für Druck und Temperatur die Werte:

$$p = 0,008 \text{ at,}$$

$$T = 245 \text{ }^\circ\text{K .}$$

Der Temperatur $T = 245 \text{ }^\circ\text{K}$ entspricht eine Schallgeschwindigkeit von $w_s = 314 \text{ m/s}$. Unter Benutzung des ρ_{NO} - Diagramms (Tafel 5) bzw. der in [5] angegebenen Gleichungen erhält man für den Flugzustand die dimensionslosen Werte $M_{fl} = 1,633$ und $\rho_{fl} = 0,1278$. Aus $M_{fl} = 2,0$ und $w_s = 314 \text{ m/s}$ ergibt sich die absolute Fluggeschwindigkeit zu $w_{fl} = 628 \text{ m/s}$, und aus den Werten $p_{fl} = 0,008 \text{ at}$ und $\rho_{fl} = 0,1278$ der Ruhedruck $p_0 = p_{fl}/\rho_{fl} = 0,0626 \text{ at}$.

Nimmt man auch hier einen geraden Verdichtungsstoß im Diffusor des Triebwerks an, so wird der reduzierte Ruhedruck $p_0' = 0,0452 \text{ at}$. Für die Größe der erreichbaren Ausströmgeschwindigkeiten ist die Ruheenthalpie des Verbrennungsgasgemisches maßgebend: die Reaktionsenthalpie der Luft bei $245 \text{ }^\circ\text{K}$ hat den Wert $i_{245}^* = -12,7 \text{ kcal/kg}$, der um den Betrag $w_{fl}^2/2g = 47,1 \text{ kcal/kg}$ erhöht wird. Die Ruheenthalpie bezogen auf 1 kg Heptan-Luft wird dann nach (15) $i_0^* = -1,0 \text{ kcal/kg}$.

Mit einer Brennkammereintrittsgeschwindigkeit $w_1 = 80 \text{ m/s}$ wird - wie in Abschnitt 7.1.1 näher ausgeführt - $p_1' = 0,0441 \text{ at}$, $T_1 = 436 \text{ }^\circ\text{K}$, $i_1^* = -1,8 \text{ kcal/kg}$ und die Dichte $\rho_1 = 0,003514 \text{ kg s}^2/\text{m}^4$, wofür im i^*,s -Diagramm $M_1 = 28,964$ abgelesen wird. Nach (19b) ist dann $\rho_1 w_1 = \rho_2 w_2 = 0,28112 \text{ kg s/m}^3$.

Für die Konstruktion der Verbrennungsisoplane sind in der folgenden Tabelle die nach (17a) ermittelten Enthalpiewerte bei Beendigung der

- 18 -

Verbrennung und die mit Hilfe der i^*,s - Tafel gefundenen Druckwerte zusammengestellt. Im Diagramm 9 ist die Isoplane dieses Beispiels dargestellt. Es zeigt sich, daß nur ein kleiner Teil existent ist, d.h. Mindest- und Höchstgeschwindigkeit am Brennkammeraustritt liegen verhältnismäßig dicht beieinander: $w_{2,\min} = 484 \text{ m/s}$ ($i_2^* = -29 \text{ kcal/kg}$) und $w_{2,\max} = 853 \text{ m/s}$ ($i_2^* = -88 \text{ kcal/kg}$). Bei maximaler Wärmezufuhr, also bei Erreichung von $w_2 = 853 \text{ m/s}$, beträgt der Verbrennungsdruck etwa $p_2 = 0,020 \text{ at}$. Das Lot im Punkt 2 (Diagramm 9) schneidet die Horizontale der Kesselenthalpie i_0^* bei einem Druck $0,055 \text{ at}$, d.h. der Druckverlust während der Verbrennung beträgt $0,010 \text{ at}$, entsprechend 22% . Bei dem diesem Beispiel zugrunde liegenden Flugzustand ist der prozentuale gasdynamische Druckverlust bei maximaler Wärmezufuhr also nur ein Drittel so groß wie im ersten Beispiel.

Geschwindigkeit, Enthalpie, Dichte und Druck nach der Verbrennung.

w_2	200	400	500	600	800	850	900	1000
$\rho_2 \cdot 10^4$	14,06	7,03	5,62	4,69	3,51	3,31	3,12	2,81
i_2^*	-5,8	-20	-31	-44	-77	-87	-98	-120
p_2	0,093	0,046	0,036	0,030	0,021	0,020	0,0188	0,0165

w [m/s], ρ [$\text{kg s}^2/\text{m}^4$], i^* [kcal/kg], p [at].

7.2.2 Wirkliche und eingefrorene Entspannungsisentropie.

Wie im Beispiel für den Flugzustand $M_{f1} = 4,0$ und $H = 0 \text{ km}$ soll die Erreichung der maximalen Brennkammeraustrittsgeschwindigkeit vorausgesetzt werden, so daß die isentrope Entspannung der Verbrennungsgase von einem fiktiven Kesselzustand mit den Daten $i_0^* = -1 \text{ kcal/kg}$, $p_0'' = 0,035 \text{ at}$, $T_0'' = 2214 \text{ }^\circ\text{K}$ und $M_0'' = 28,085 \text{ kg/kmol}$ (vgl. i^*,s - Diagramm) erfolgt. Die wie in Abschnitt 7.1.2 nach (21) ermittelte wirkliche Isentrope und die nach Gleichung (22) berechnete "eingefrorene" Isentrope sind im

- 20 -

Diagramm 7 dargestellt. Der Adiatenexponent κ hat nach (23) den Wert $\kappa = 1,3031$.

Die maximale Geschwindigkeit errechnet sich für die wirkliche Isentrope mit $\Delta i_{\max}^* = 767 \text{ kcal/kg}$ zu $w_{\max} = 2534 \text{ m/s}$ und für die eingefrorene Isentrope aus (22) zu $w_{\max} = 2375 \text{ m/s}$.

Der kritische Zustand der wirklichen Isentrope läßt sich - wie in Abschnitt 7.1.2 beschrieben - aus der Auftragung des Verhältnisses w/v über w ermitteln: $w_{kr} = 860 \text{ m/s}$, $p_{kr} = 0,0197 \text{ at}$, entsprechend den Daten des unteren Endpunktes des existenten Isoplanenastes. Und bei der eingefrorenen Isoplane wird mit (25) $w_{kr} = 861 \text{ m/s}$ und mit (24) $p_{kr} = 0,0191 \text{ at}$.

Die Abweichungen der eingefrorenen von der wirklichen Entspannungs-isentrope sind hier noch etwas größer als im ersten Beispiel (vgl. Diagramm 7):

1. Bei niederen Entspannungsverhältnissen weicht die Ausströmgeschwindigkeit bis zu 15 % vom wirklichen Wert ab.
2. Etwa vom Druck 0,025 at ab wird die Geschwindigkeit zu klein ermittelt, wobei der Fehler stark mit dem Entspannungsverhältnis wächst. Beim Entspannungsverhältnis 1 : 2,5 ($p = 0,014$) beträgt der Unterschied 35 m/s bzw. 3,3 %, bei der Entspannung auf den Außendruck $p_a = 0,008 \text{ at}$ dagegen 70 m/s entsprechend 5,2 %.
3. Die maximale Ausströmgeschwindigkeit wird um 159 m/s zu klein, entsprechend 6,3 %.
4. Der mit der eingefrorenen Isentrope ermittelte kritische Druck weist einen Fehler von - 3 % auf.

8. Zusammenfassung.

Ausgehend von entsprechenden Gruppen - $n_C/n_H = 0,4$ und $n_C/n_H = 0,6$ - des $i^*, \sqrt{\quad}$ - Tafelsystems [3, 4] wird für das stöchiometrische Reaktionsgemisch Heptan-Luft eine i^*, s - Tafel entworfen, die sich mit ihrem Druckbereich 0,01 bis 100 at und dem Temperaturbereich 800 °K bis 4000 °K zur Behandlung der thermodynamischen Vorgänge in Staustrahltriebwerken eignet. Die unter Grenze der Dissoziation schließt den üblichen Arbeitsbereich dieser Triebwerke ein.

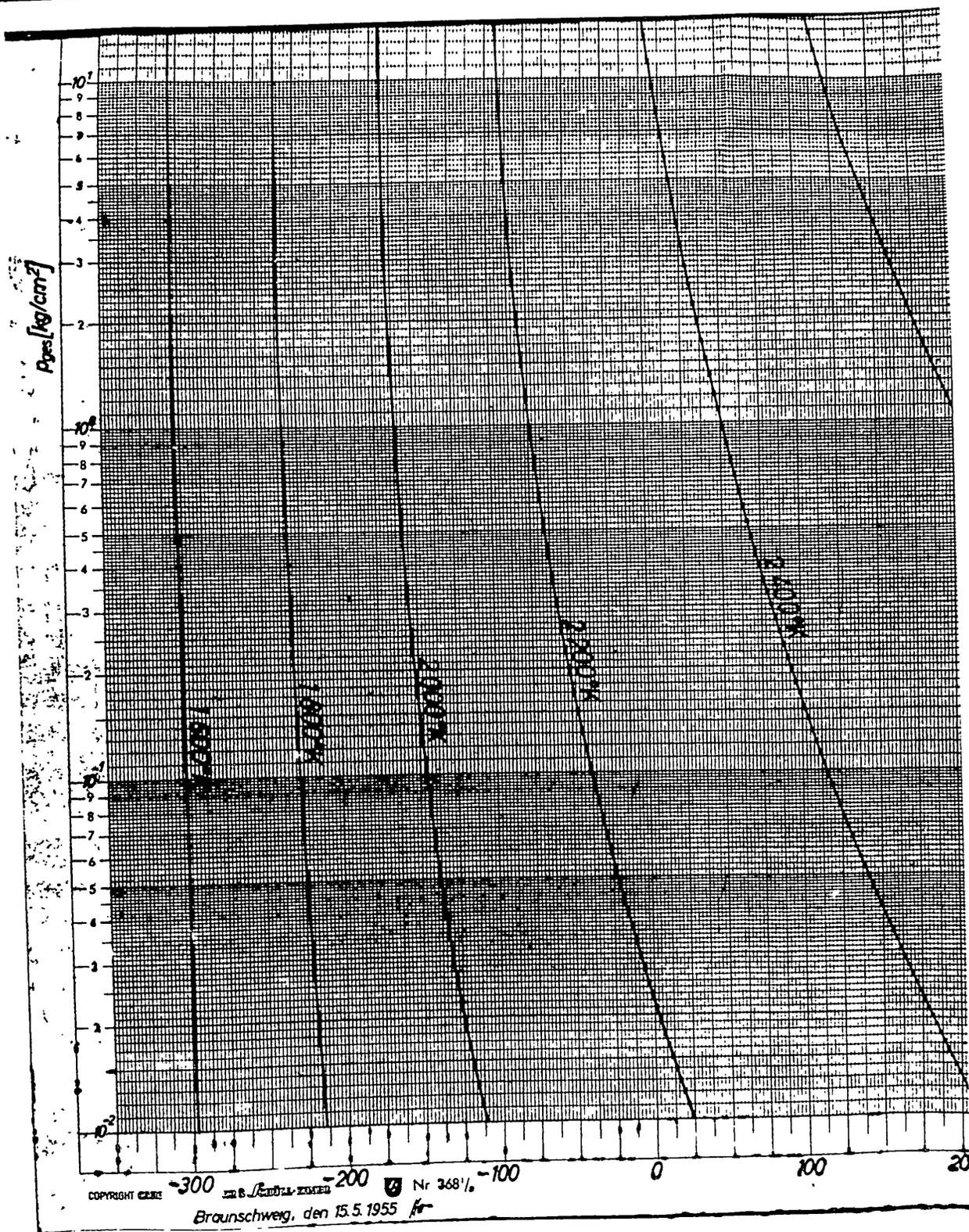
Zwei Anwendungsbeispiele erläutern den Gebrauch der i^*, s - Tafel. Für die beiden als extrem anzusprechenden Flugbereiche von Staustrahltriebwerken a. $H = 0$ km, $Ma = 4$ und b. $H = 35$ km, $Ma = 2$ werden die Verbrennungsisoplane (= Verbrennung bei konstantem Brennraumquerschnitt) und die Entspannungs-Isentrope bis auf Außenzustand berechnet. Die Isoplanen werden in der i^*, s - Tafel dargestellt. Der wirklichen Entspannungsisentrope, wie sie sich aus der Tafel ergibt, wird die "eingefrorene" Isentrope im p, w - Diagramm gegenübergestellt, wobei sich zeigt, daß die häufige Annahme des eingefrorenen Gleichgewichts eine schlechte Näherung darstellt.

- 22 -

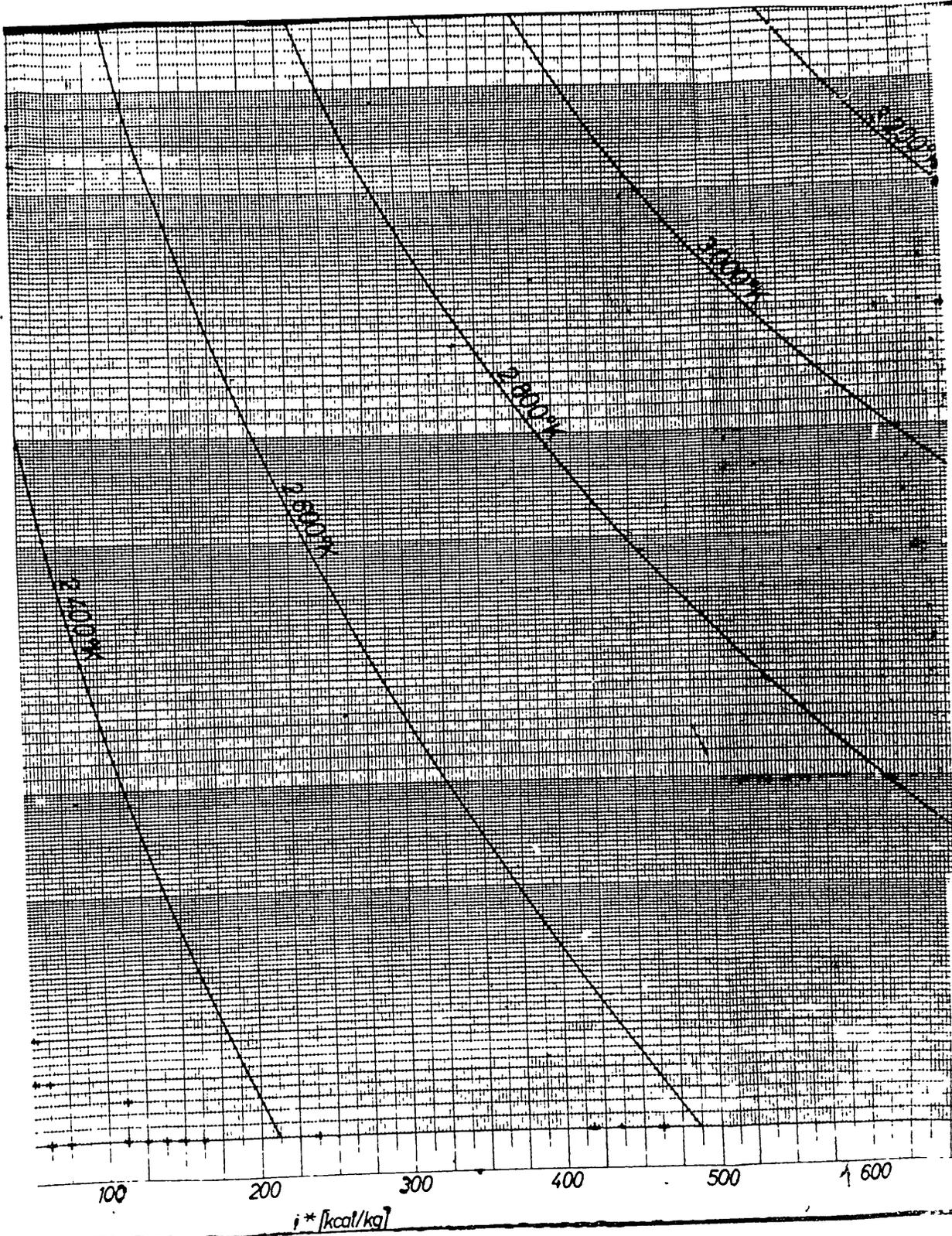
9. Schrifttum.

- [1] O.Lutz und W.Lohse : Reaktionsenthalpie - Entropie Tafel für das stöchiometrische Gemisch Hydrazin-Salpetersäure. Forschungsbericht 2/54 des Instituts S der Deutschen Forschungsanstalt für Luftfahrt (DFL), Braunschweig 1954.
- [2] O.Lutz, J.Lambrecht und W.Müller : Reaktionsenthalpie - Entropie Tafel für ein unterstöchiometrisches Gemisch Hydrazin-Salpetersäure. Forschungsbericht 10/54 des Instituts S der DFL, Braunschweig 1954 .
- [3] O.Lutz : Technische Reaktionsthermodynamik, Tafeldarstellungen für beliebige Reaktionsgemische. Forschungsbericht 12/55 des Instituts S der DFL, Braunschweig 1955 .
- [4] H.Reichert : "Enthalpy charts for dissociating gas mixtures in the temperature range 600 to 4000 deg.K." Min. of Supply, TN R.P.D. 35 (nicht veröffentlicht), 1950 .
- [5] O.Lutz : Die Anwendung des p,w - Diagramms auf Staustahltriebwerke. Forschungsbericht 7/54 des Instituts S der DFL, Braunschweig 1954 .

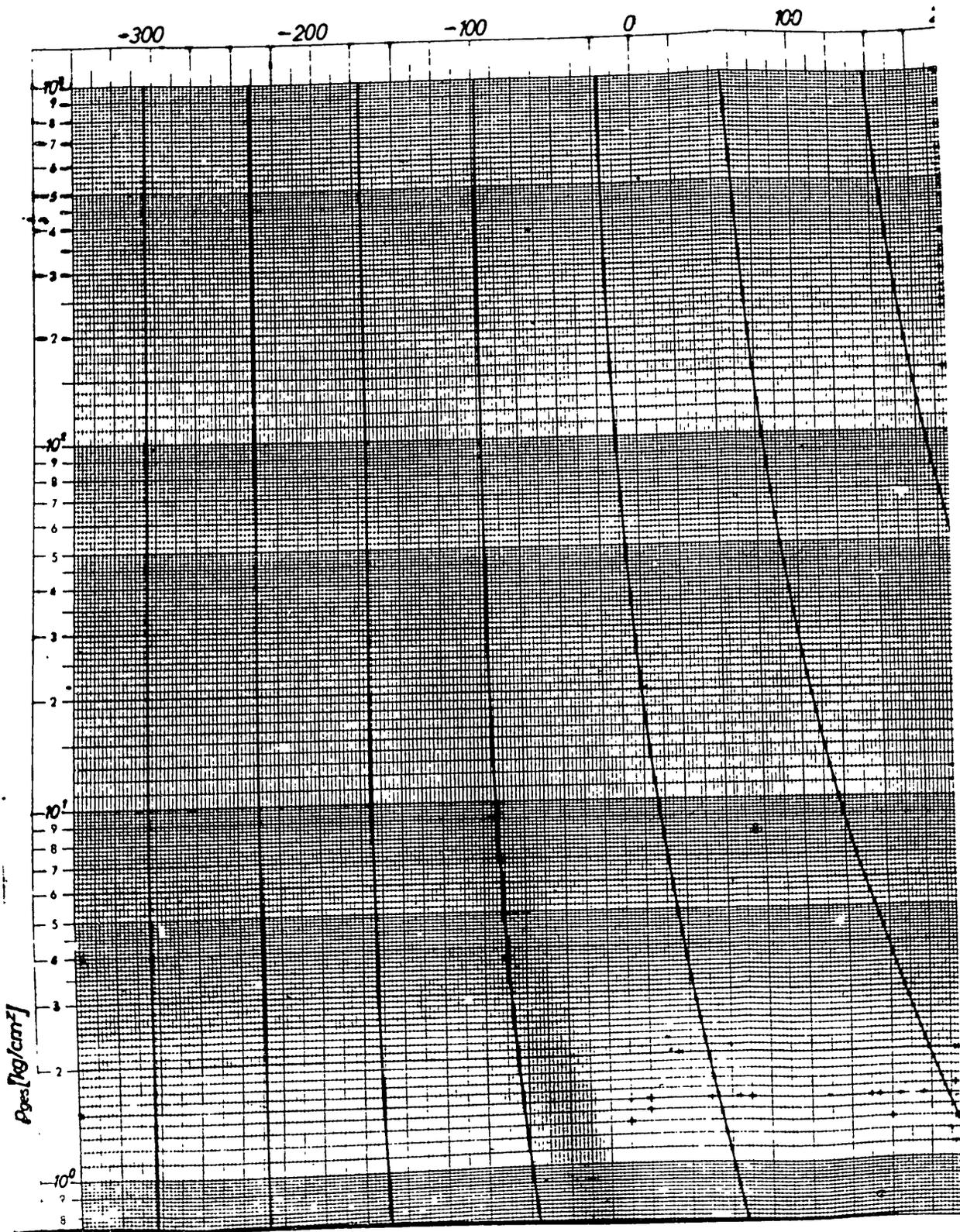
POOR ORIGINAL



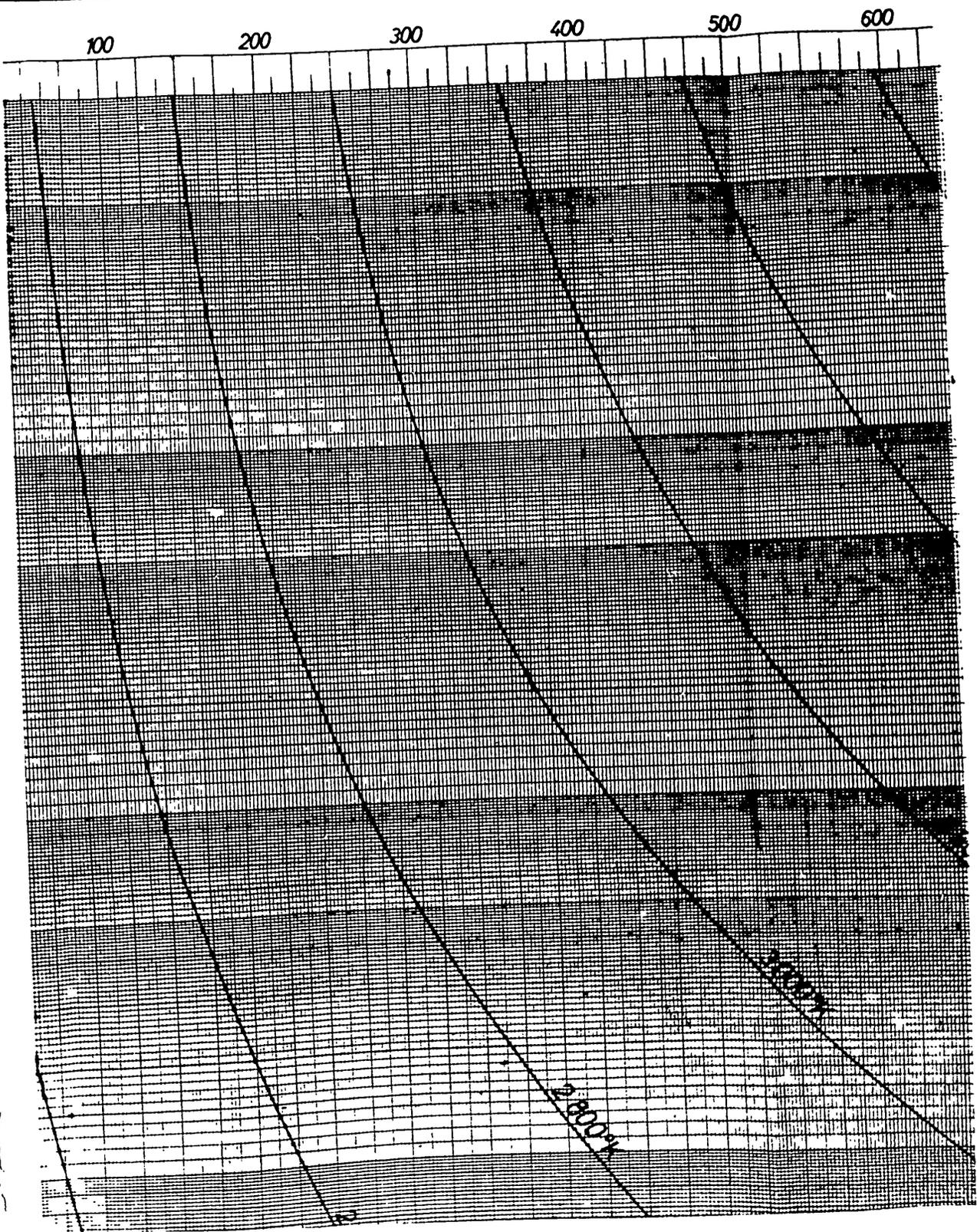
POOR ORIGINAL



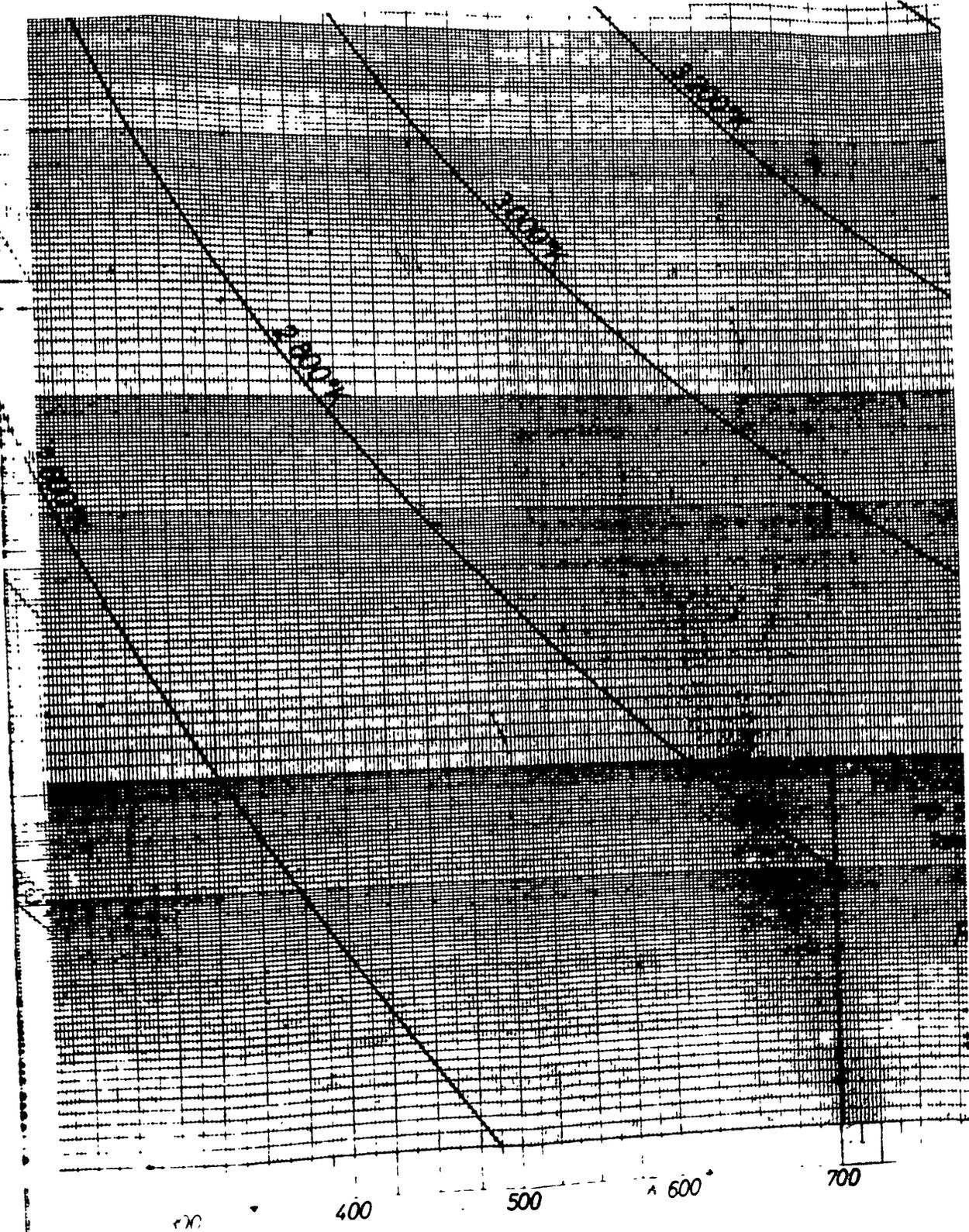
POOR ORIGINAL



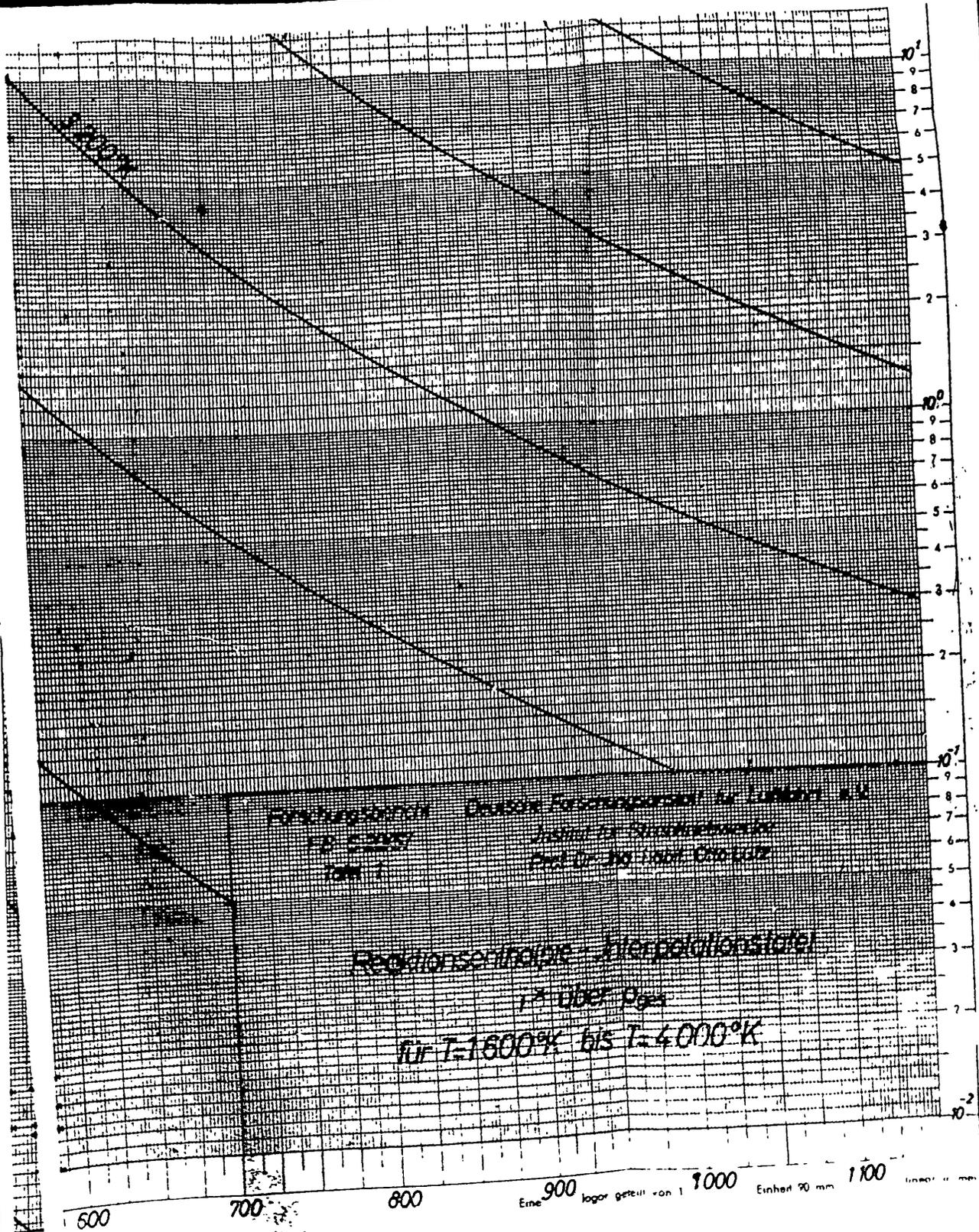
POOR ORIGINAL



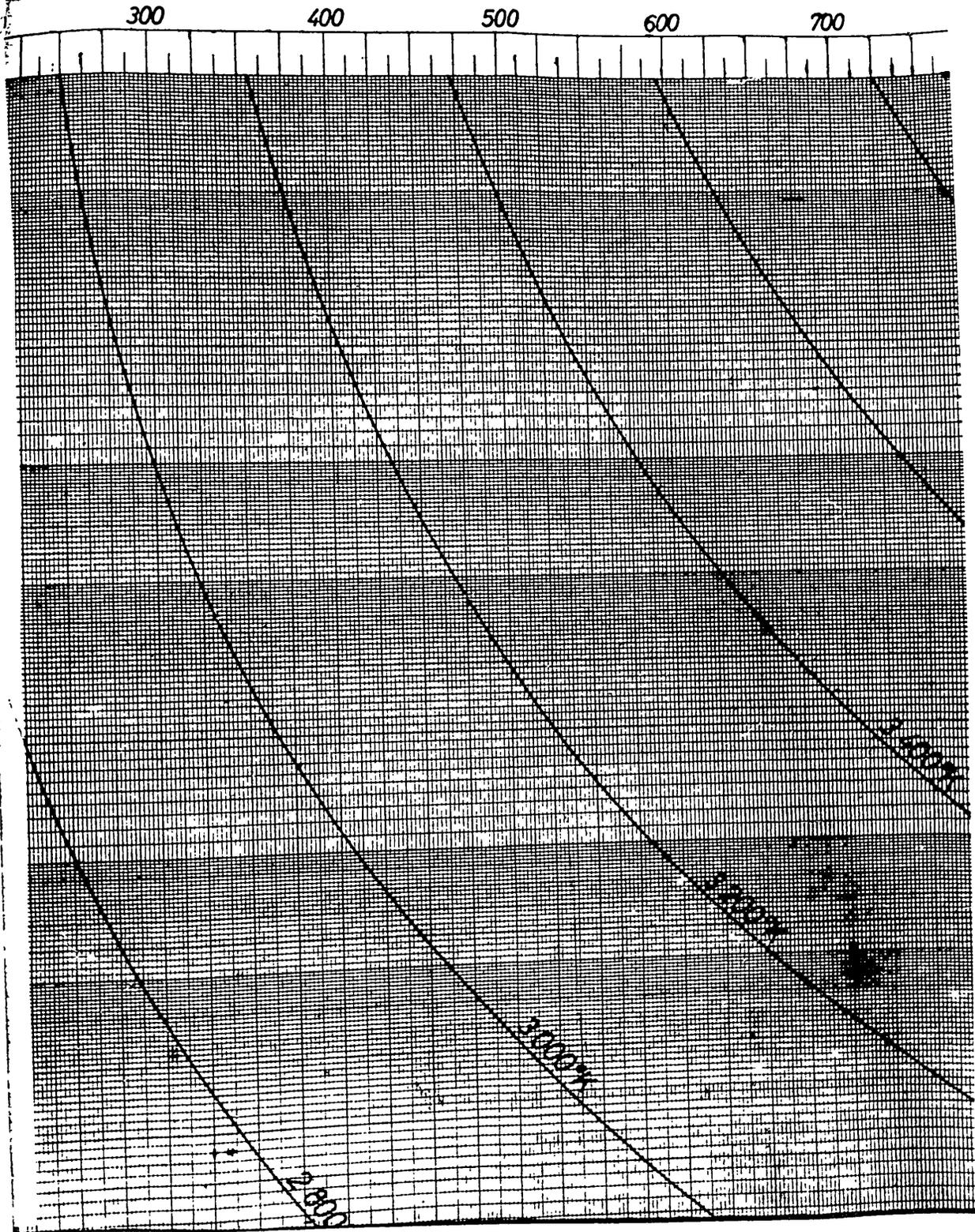
POOR ORIGINAL



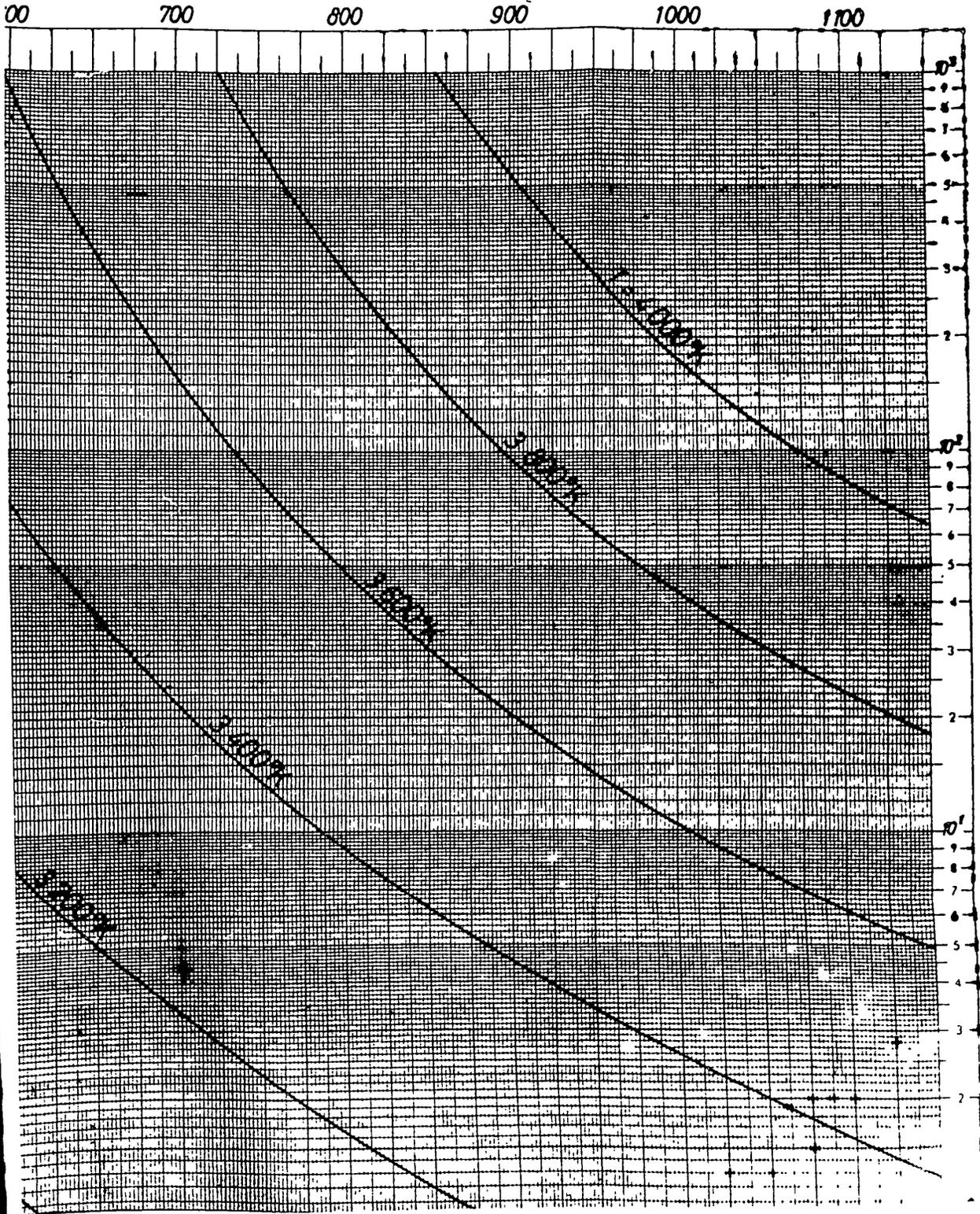
POOR ORIGINAL



POOR ORIGINAL

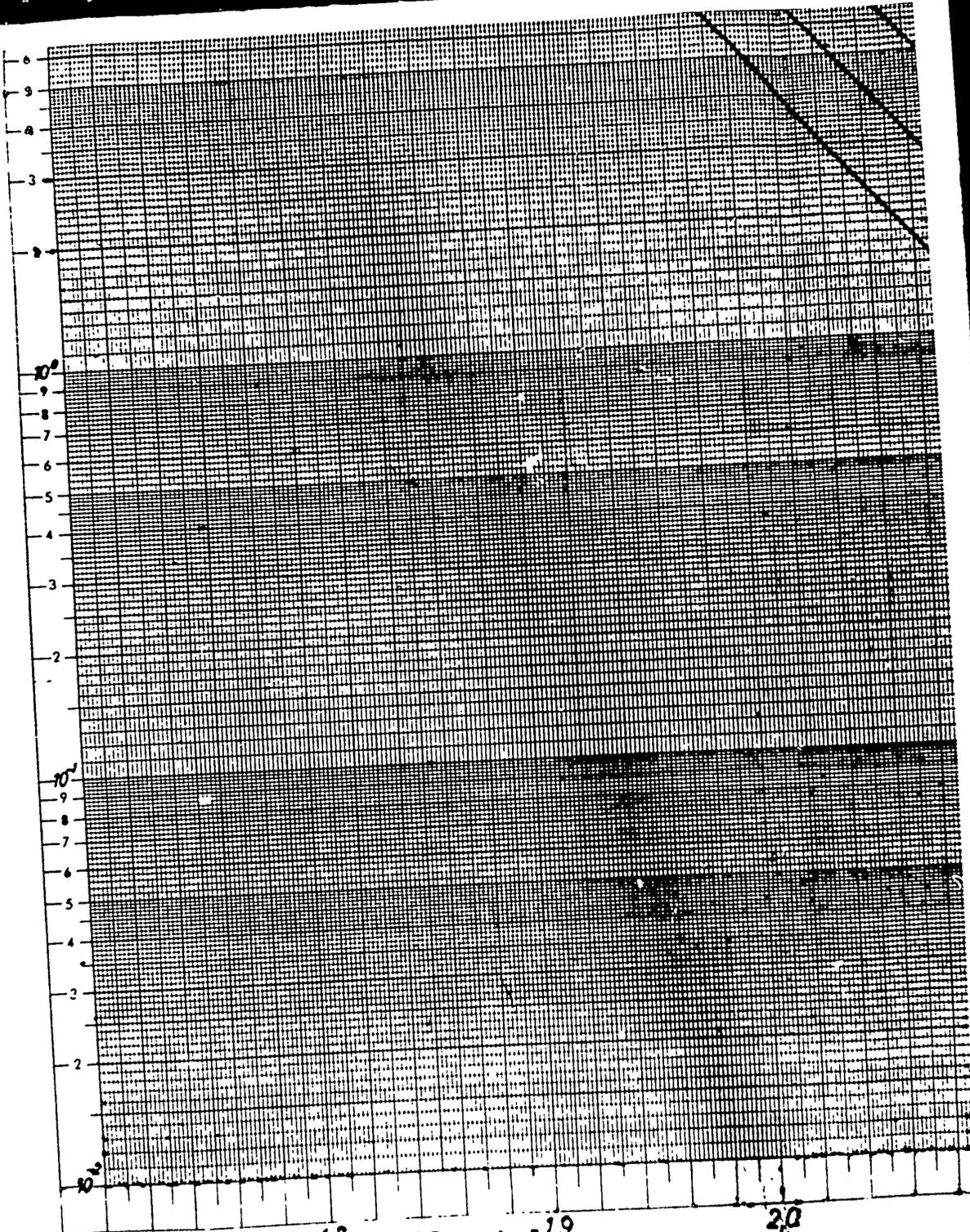


POOR ORIGINAL



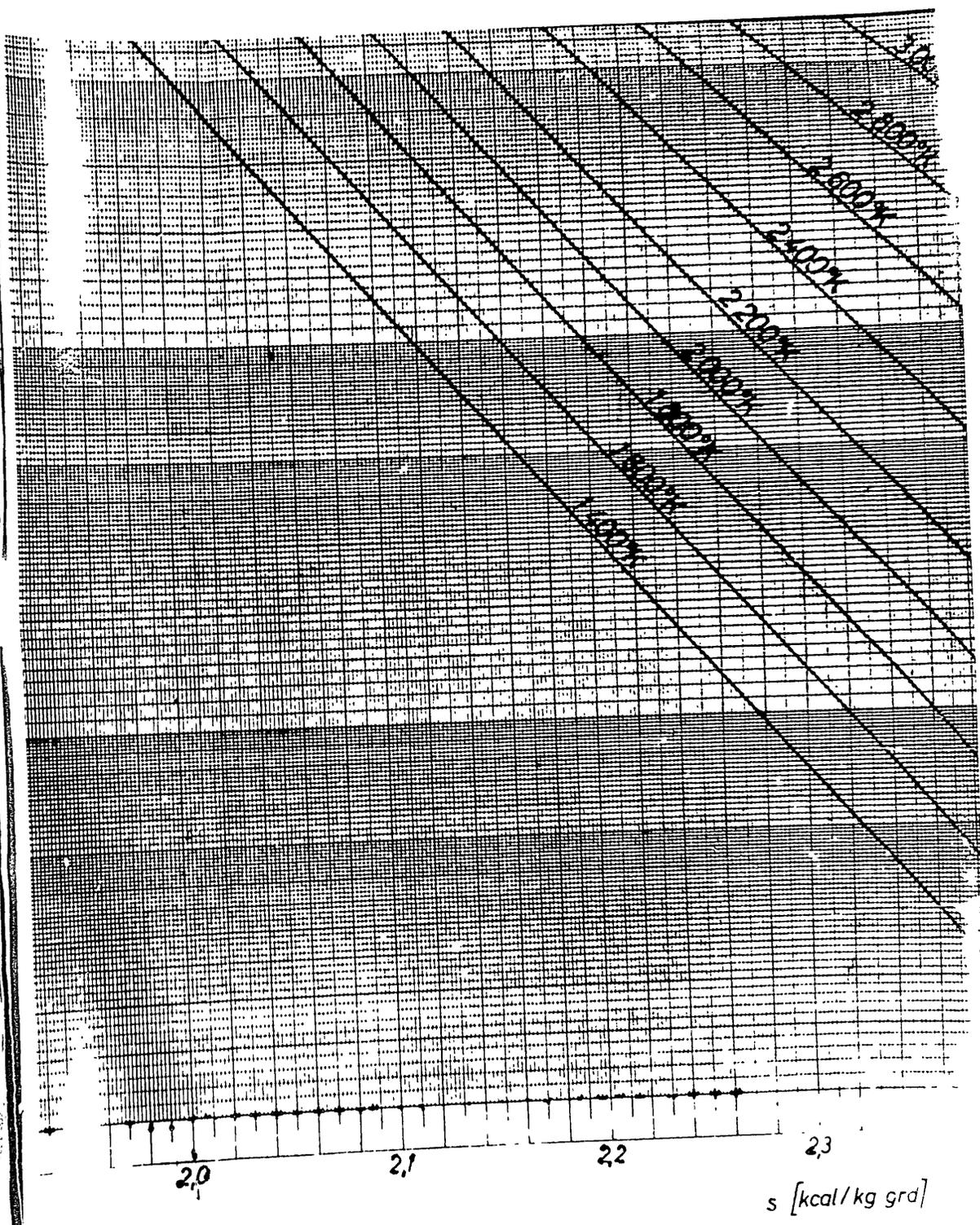
POOR ORIGINAL

ρ_{ges} [kg/cm²]

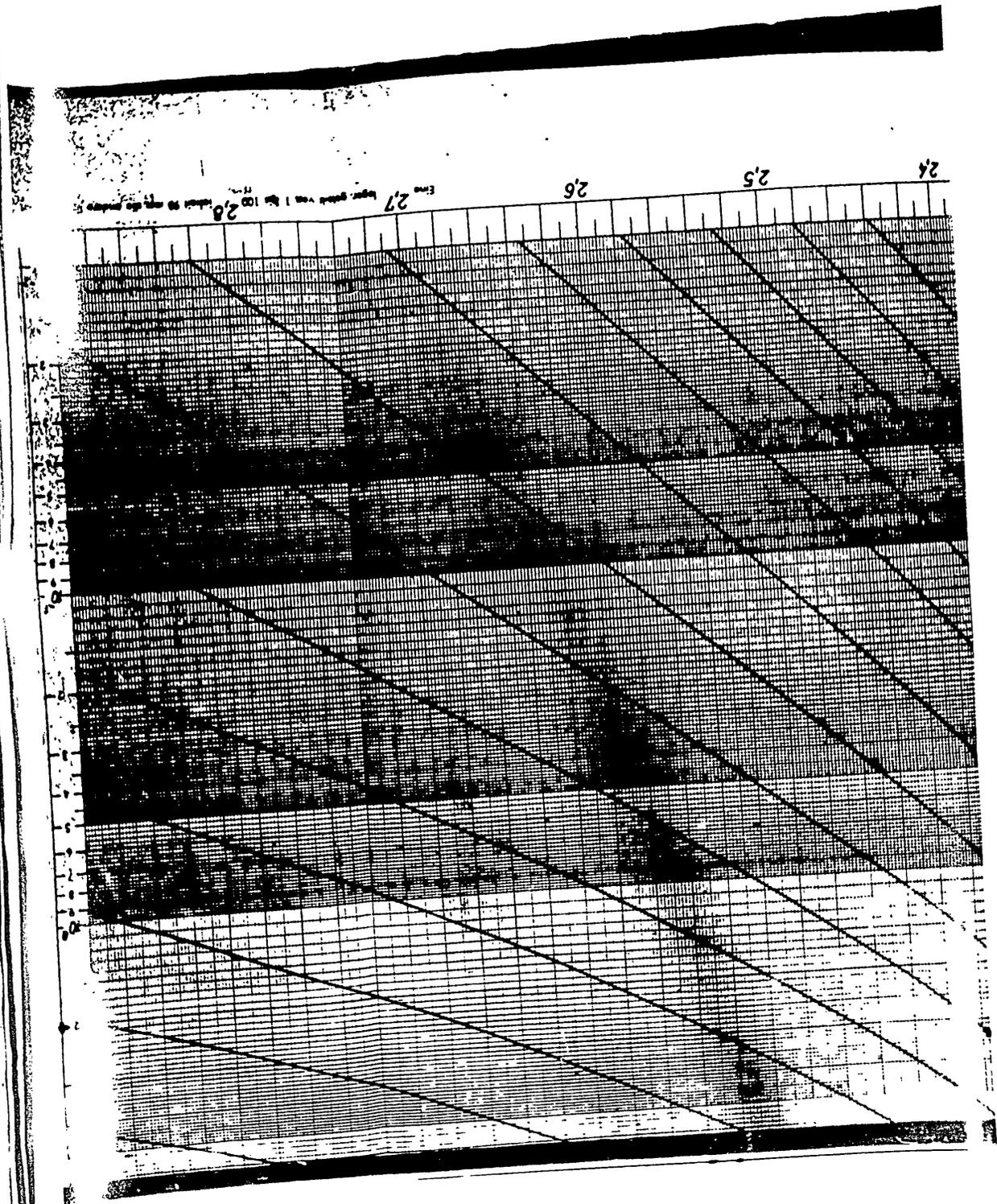


1.7 *1.8* *1.9* *2.0*
 Nr 368 1/2, p 1,9
 Braunschweig, den 15 5 1955 *hr*

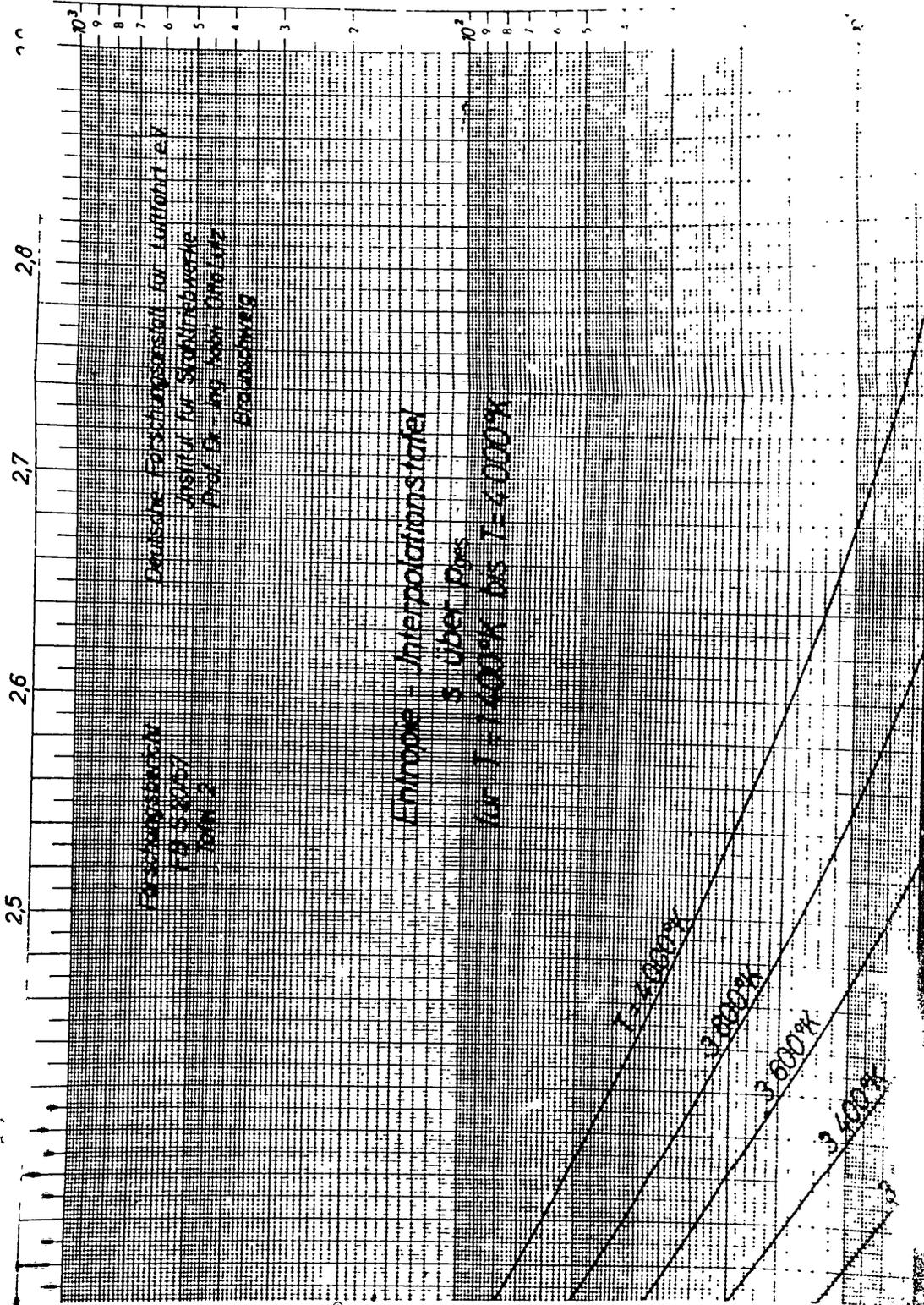
POOR ORIGINAL



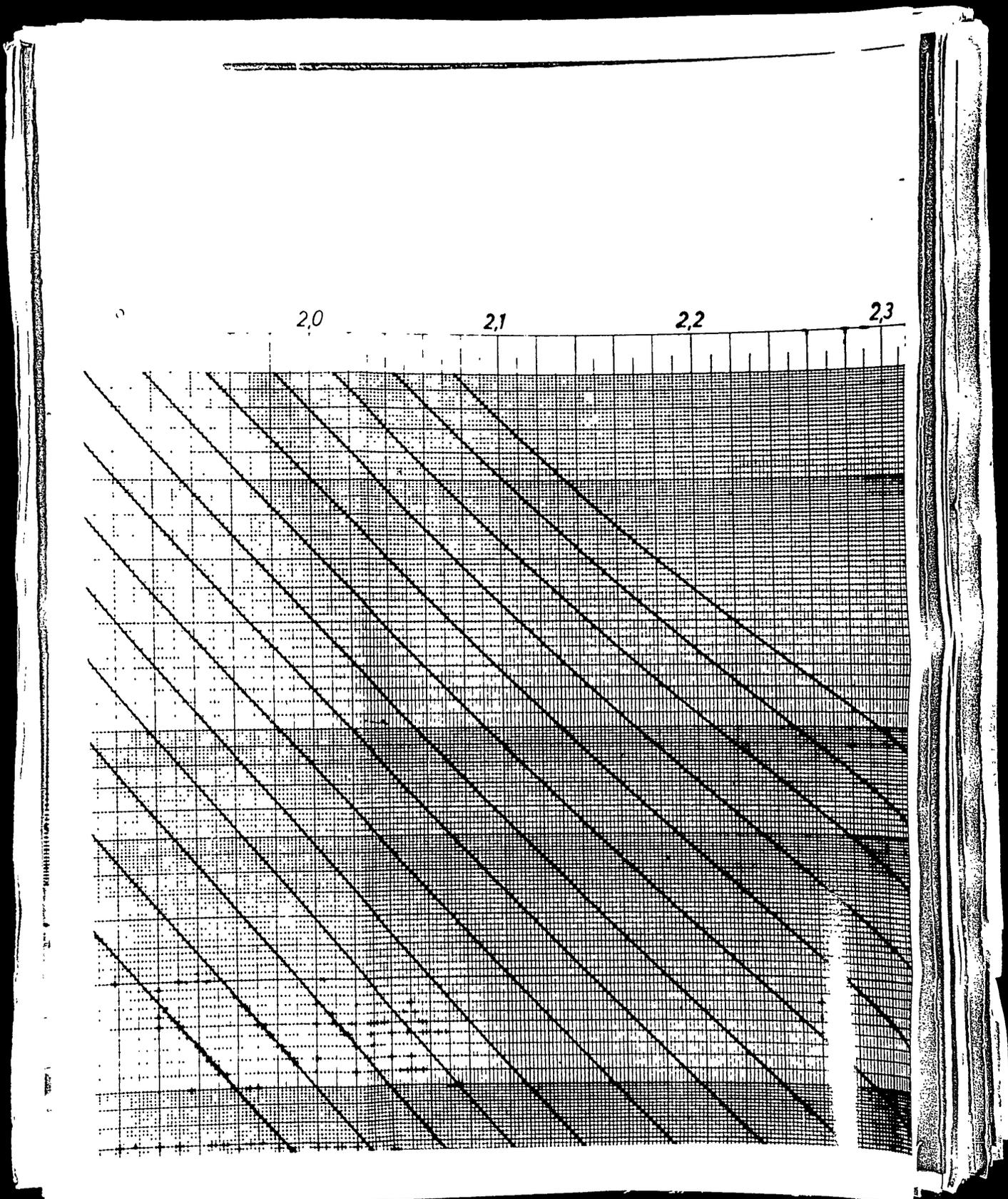
POOR ORIGINAL



POOR ORIGINAL

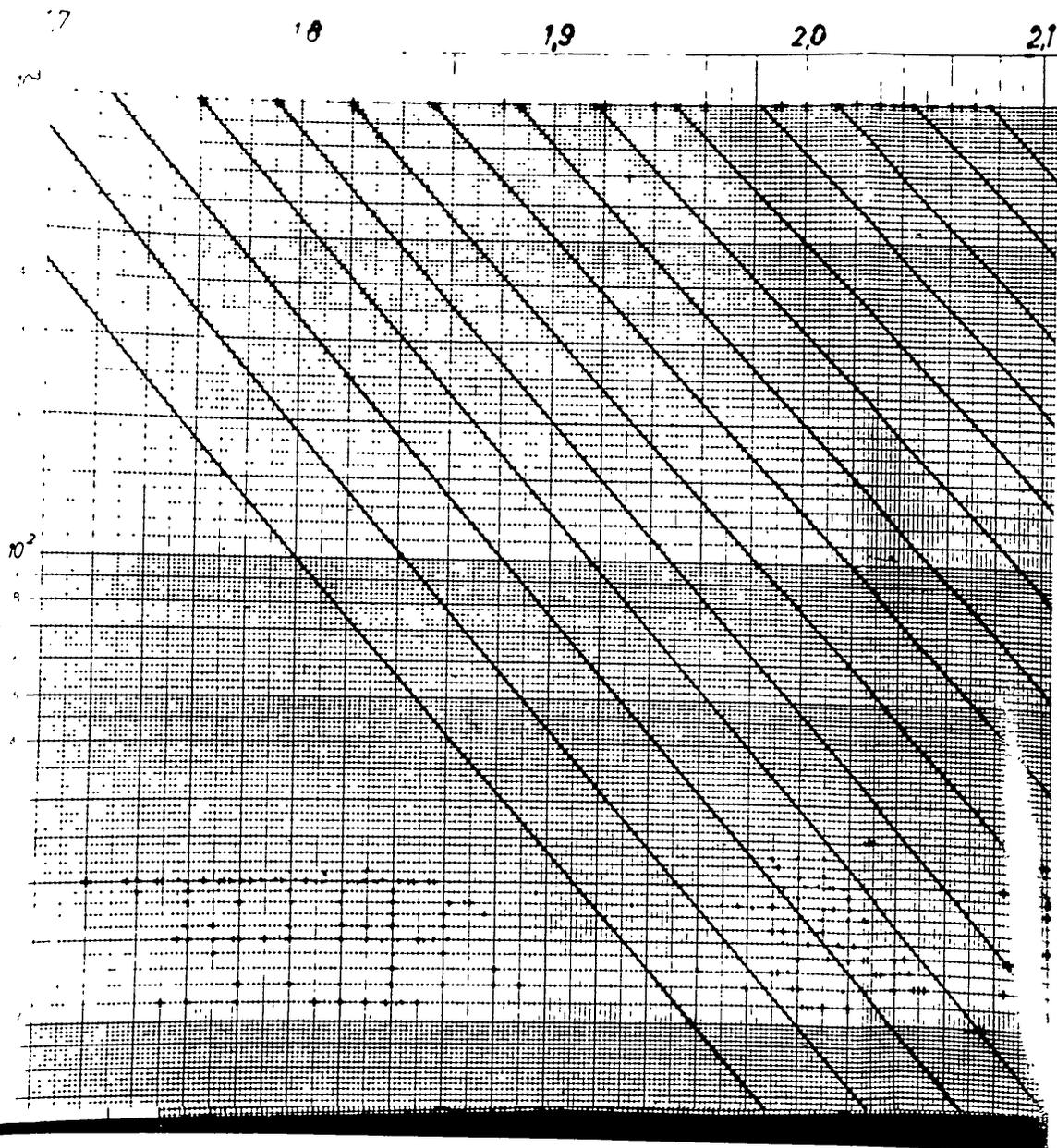


POOR ORIGINAL



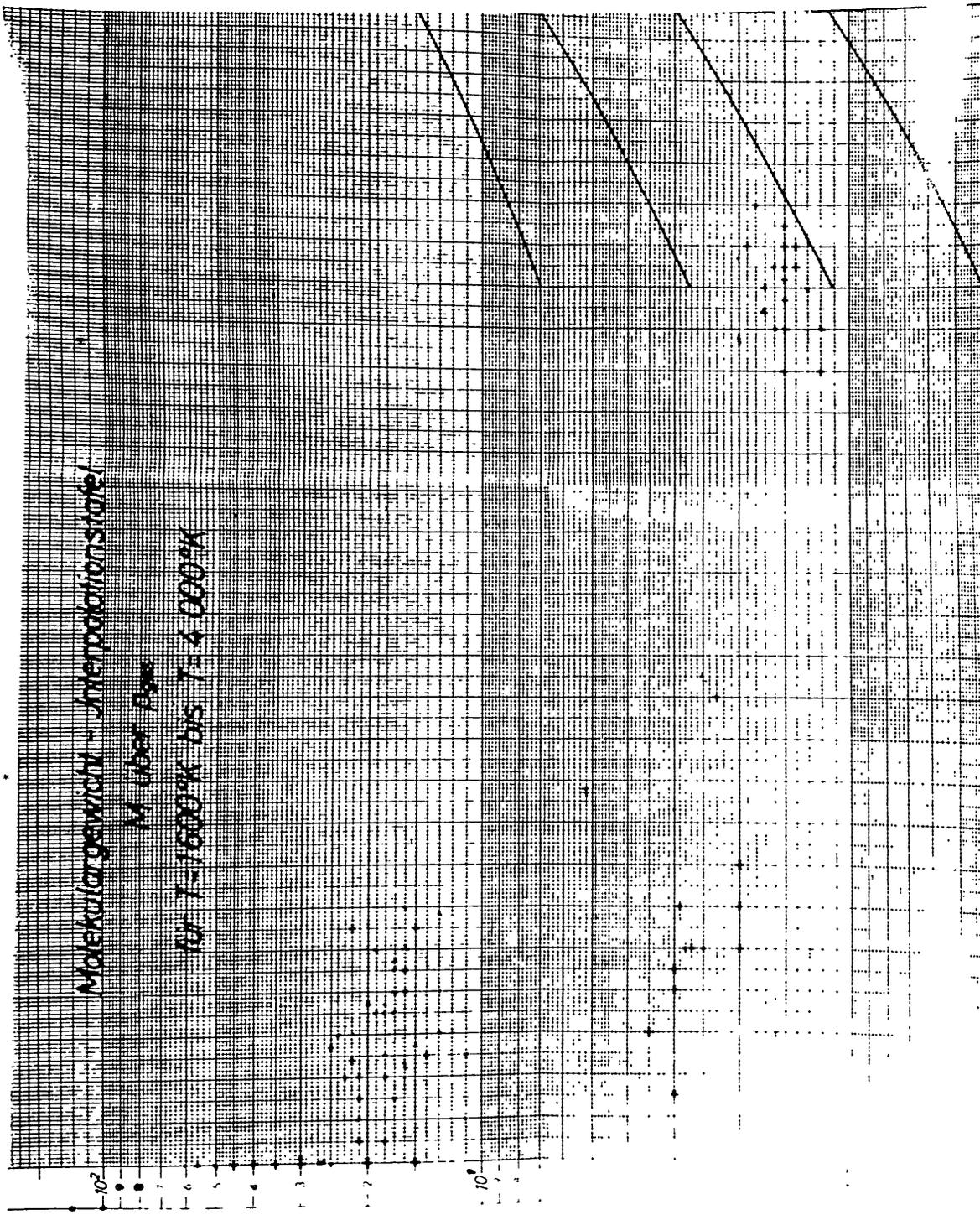
POOR ORIGINAL

P 1K5



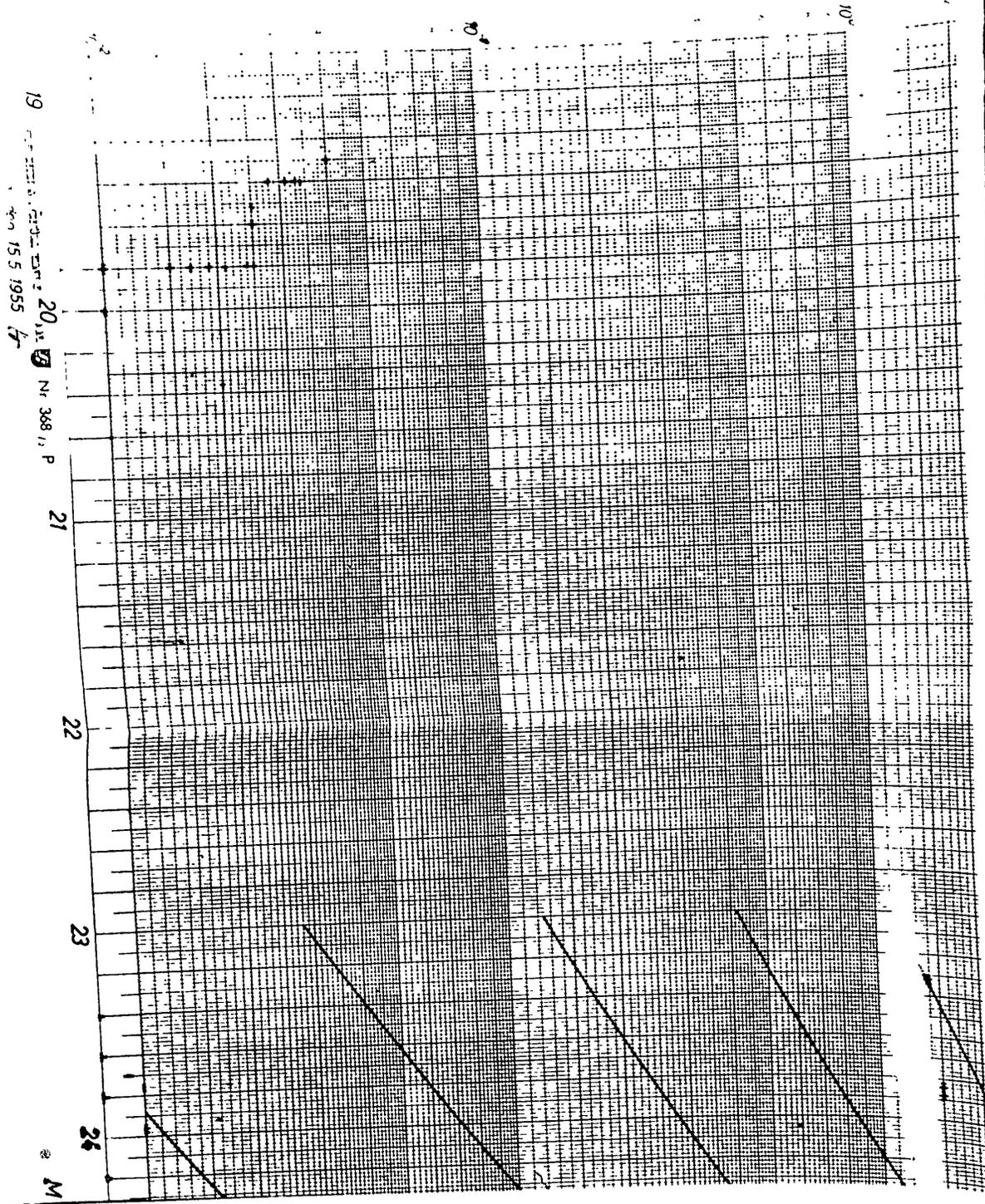
POOR ORIGINAL

MS

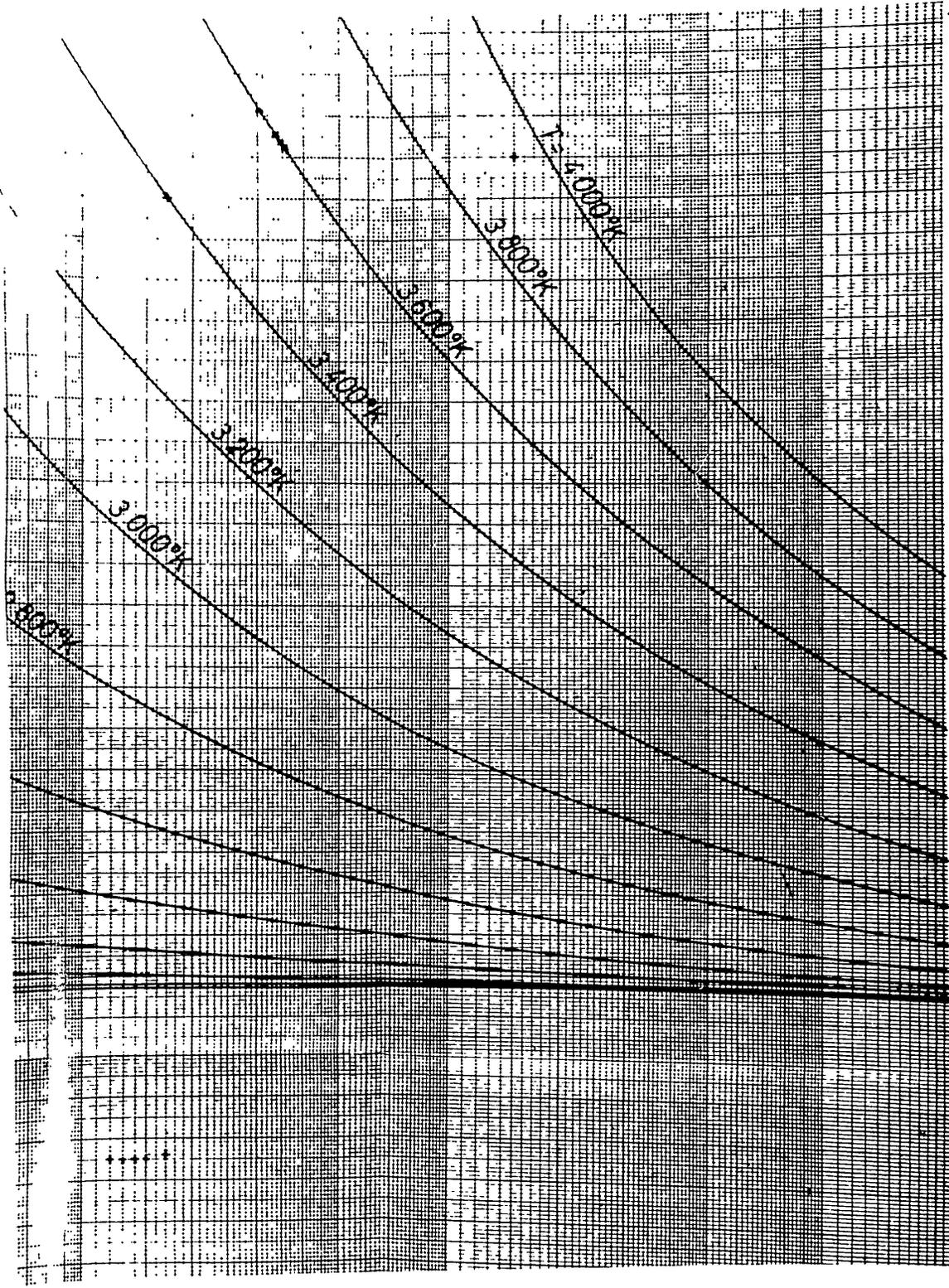


POOR ORIGINAL

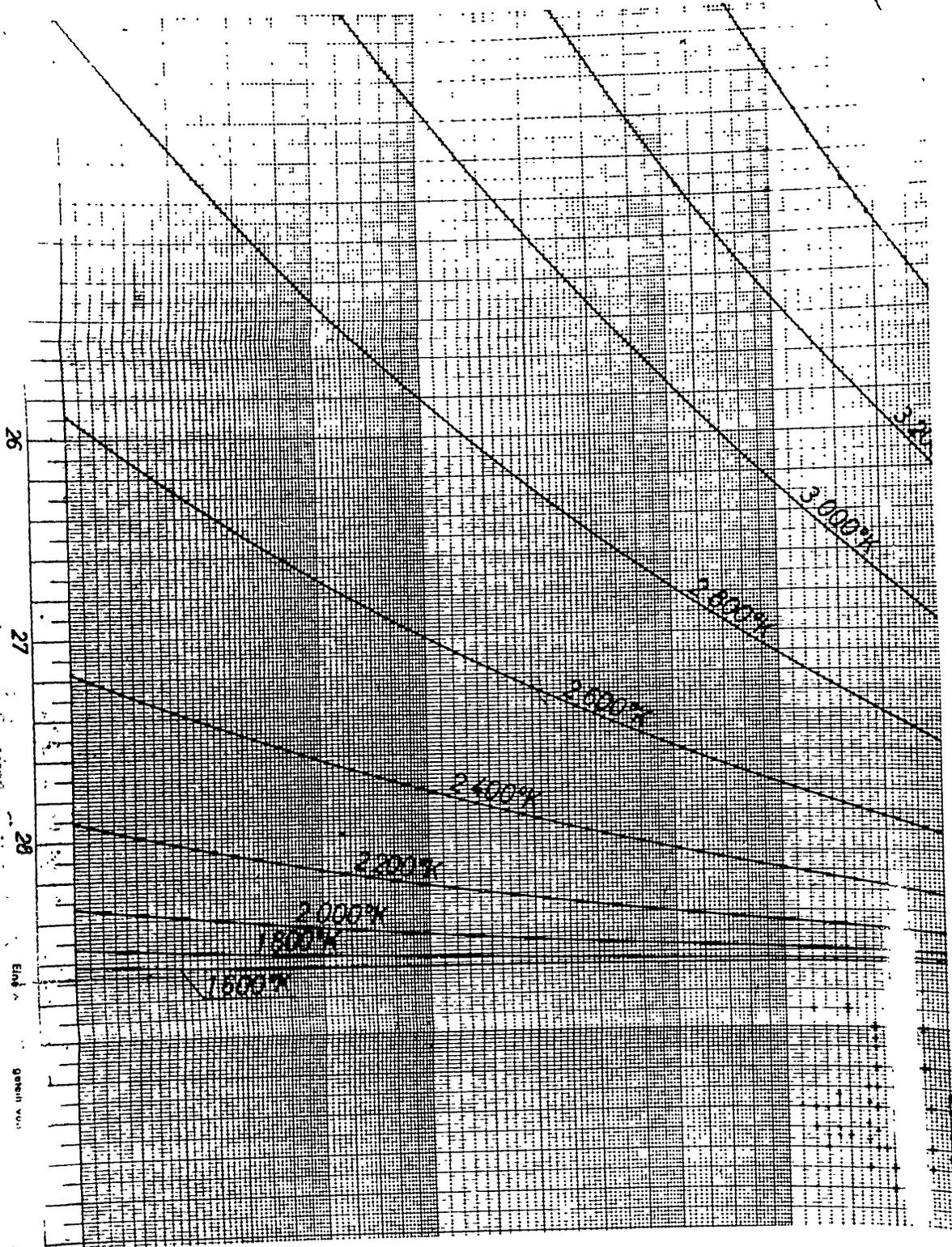
2ges /KS



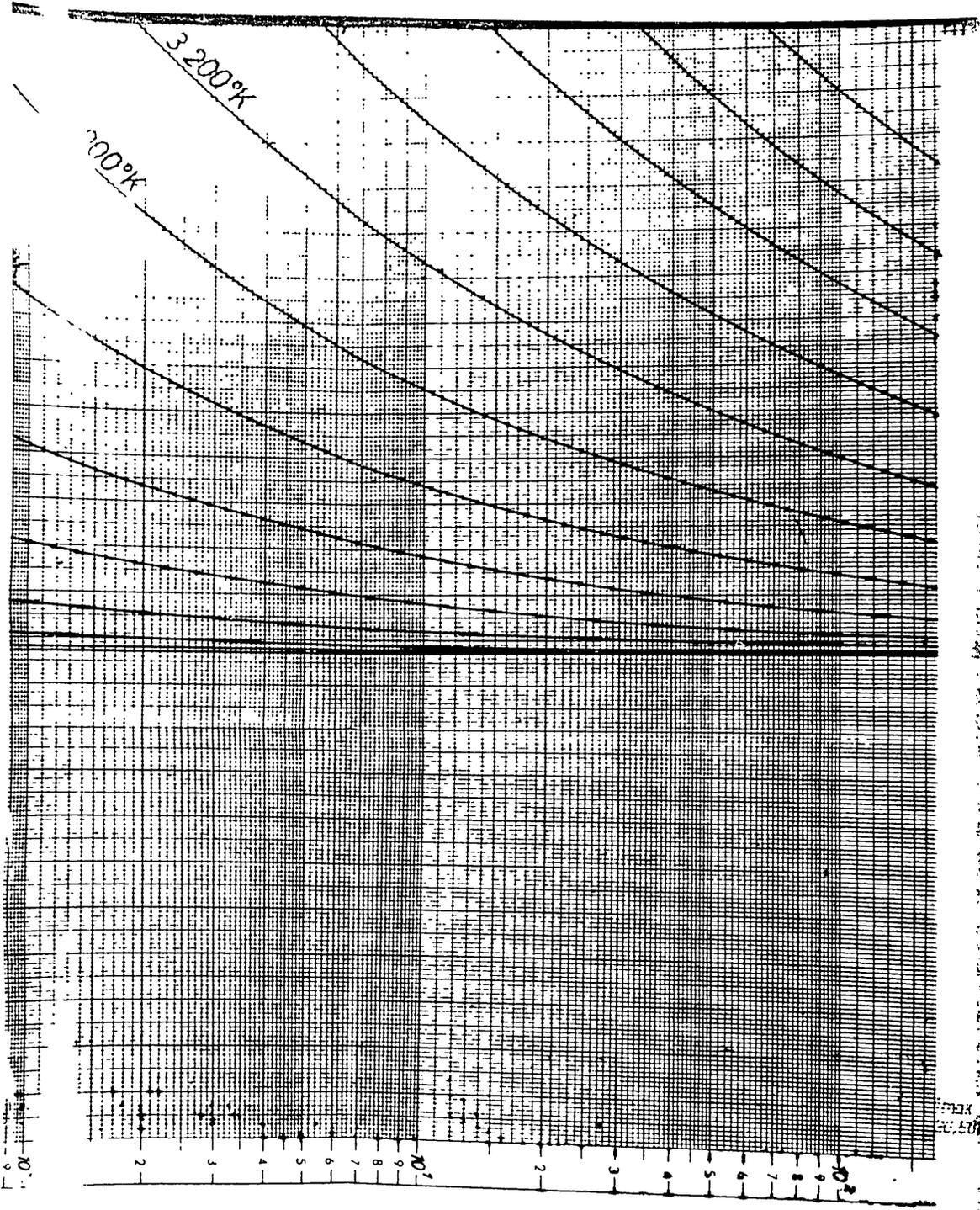
POOR ORIGINAL



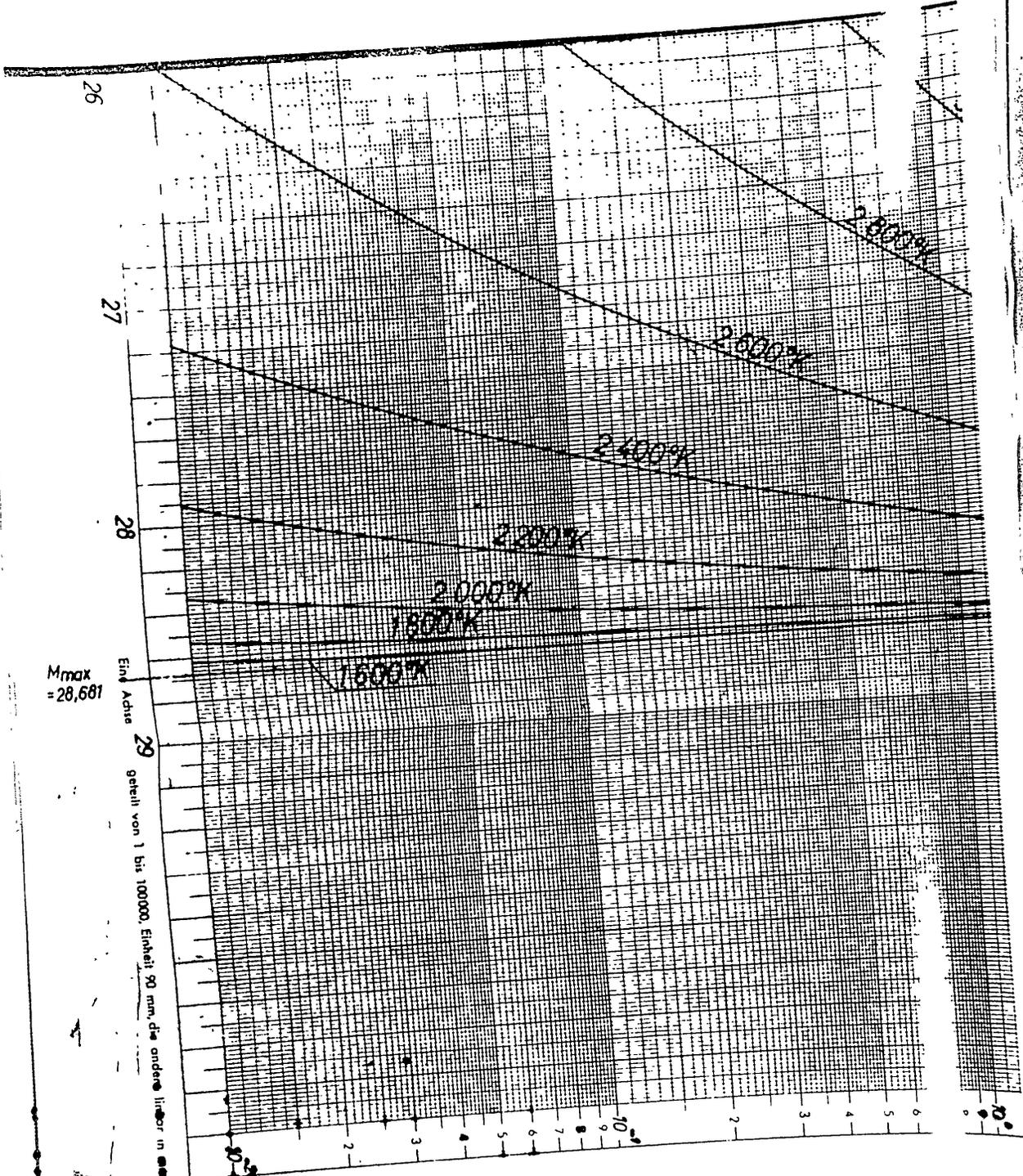
POOR ORIGINAL



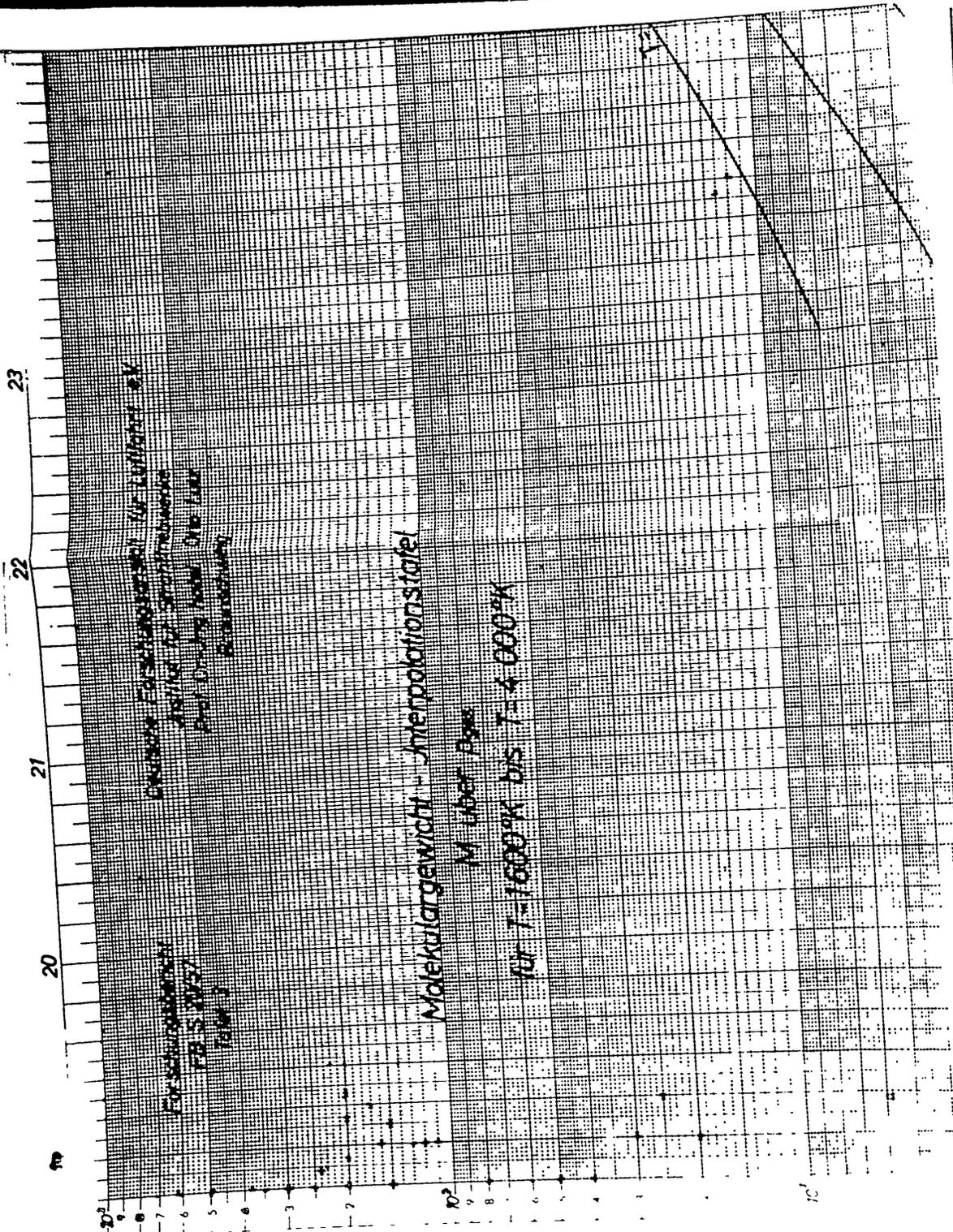
POOR ORIGINAL



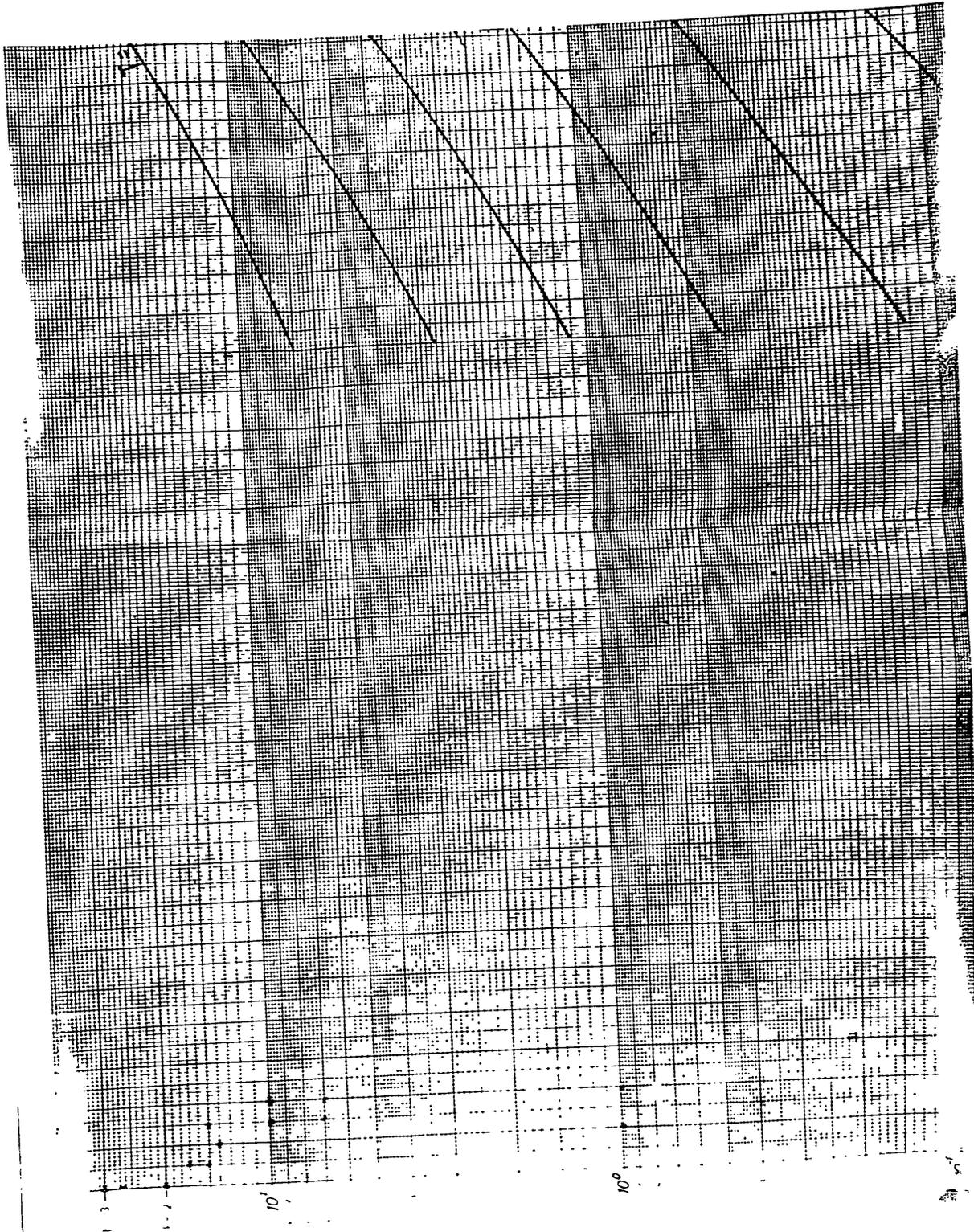
POOR ORIGINAL



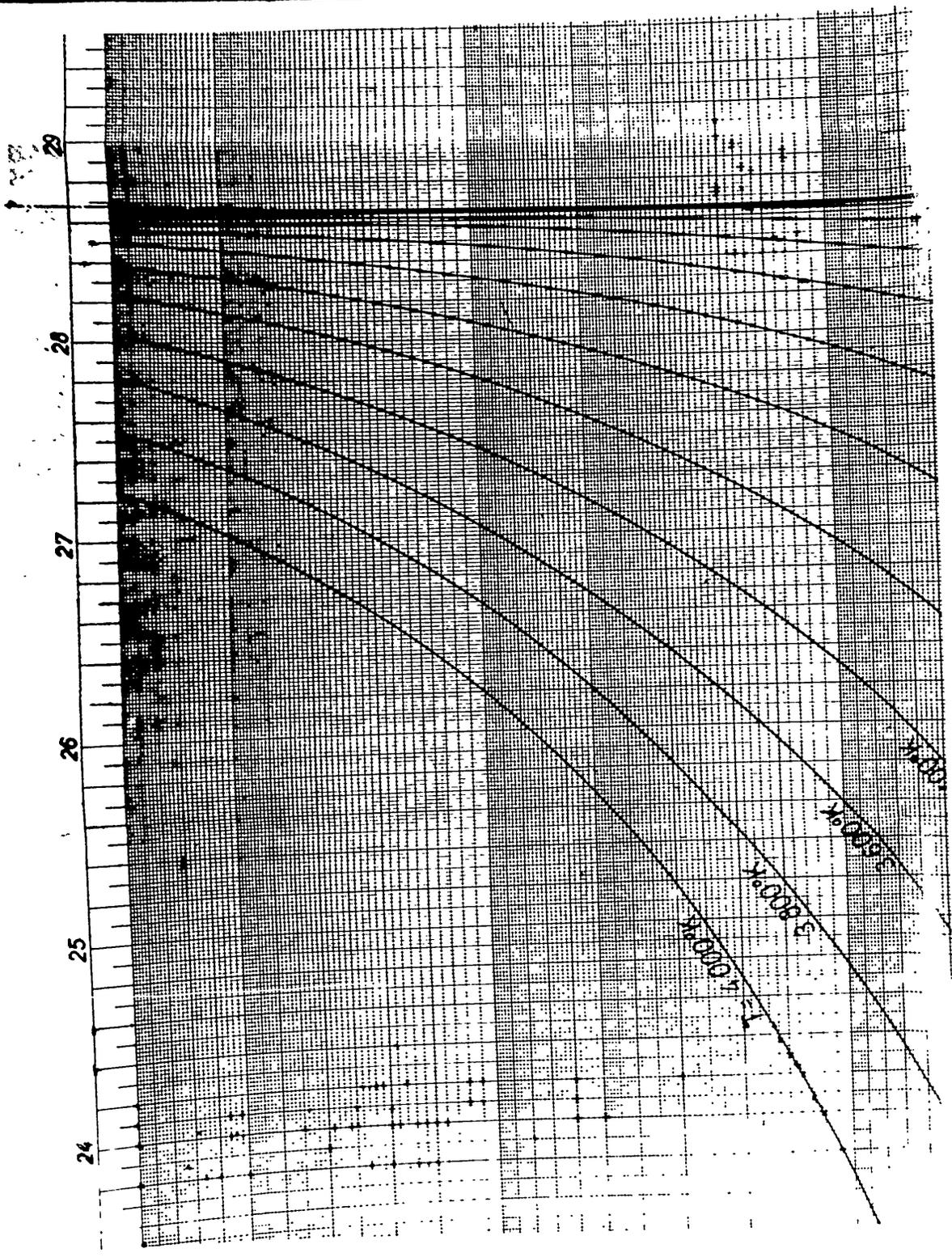
POOR ORIGINAL



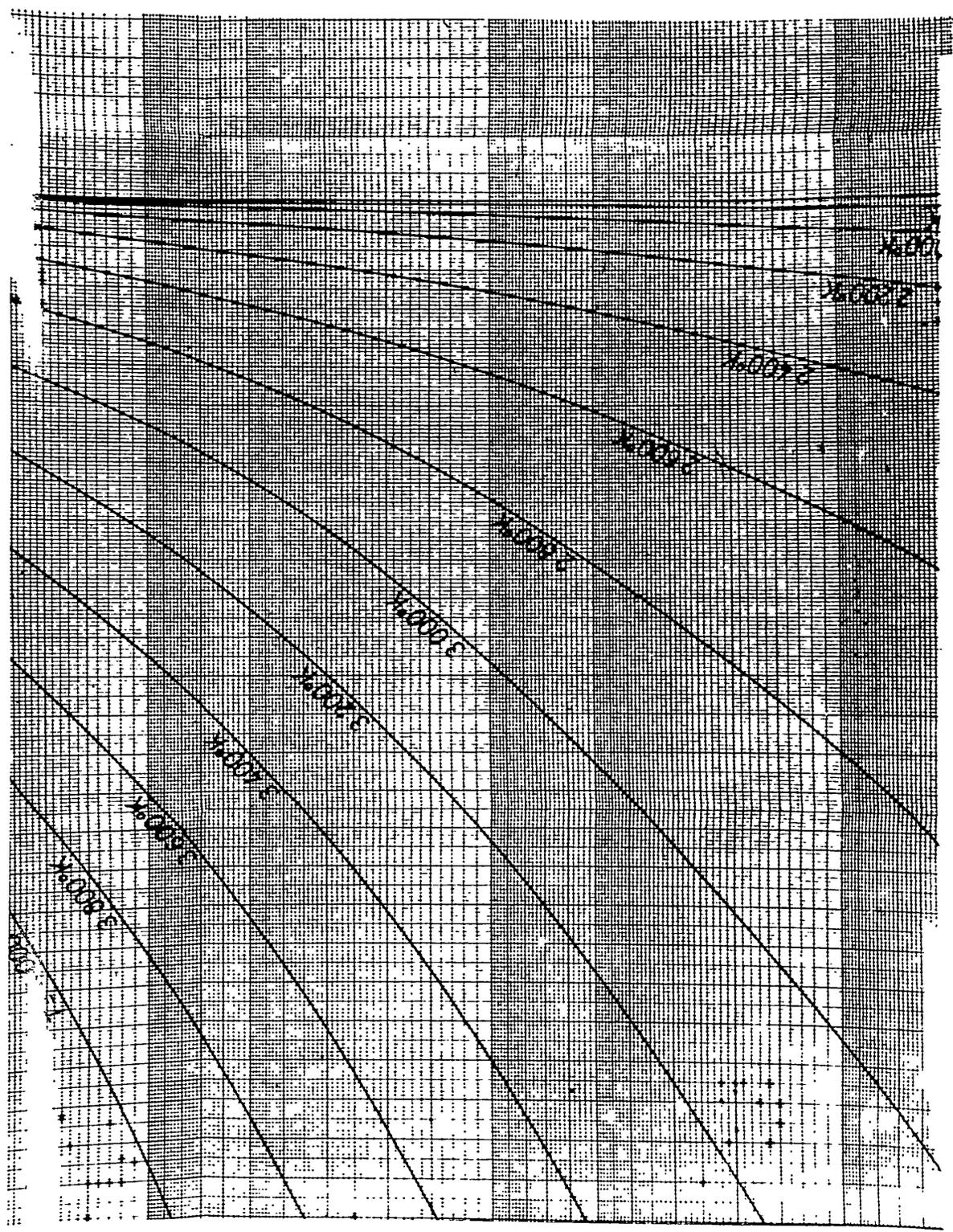
POOR ORIGINAL



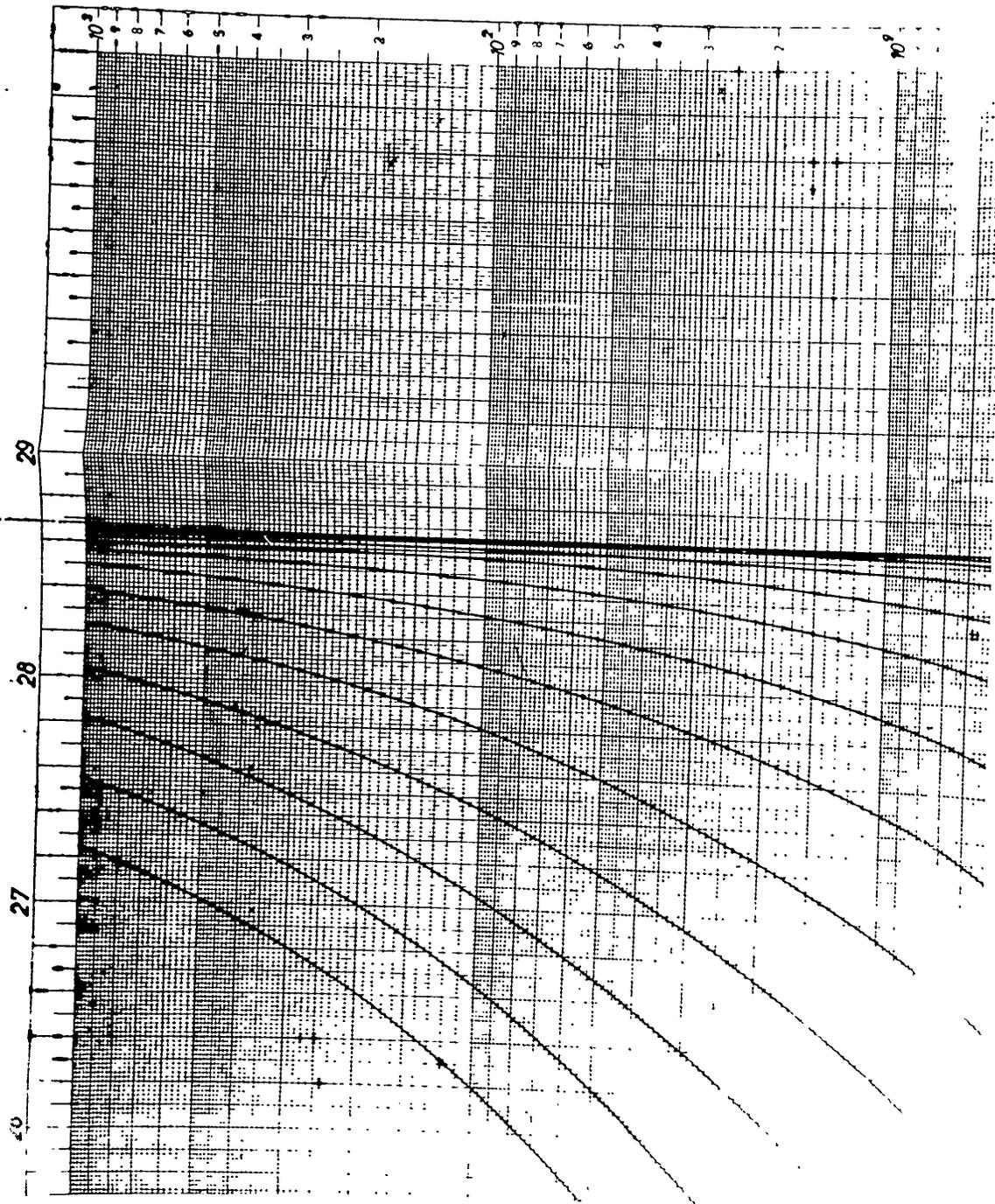
POOR ORIGINAL



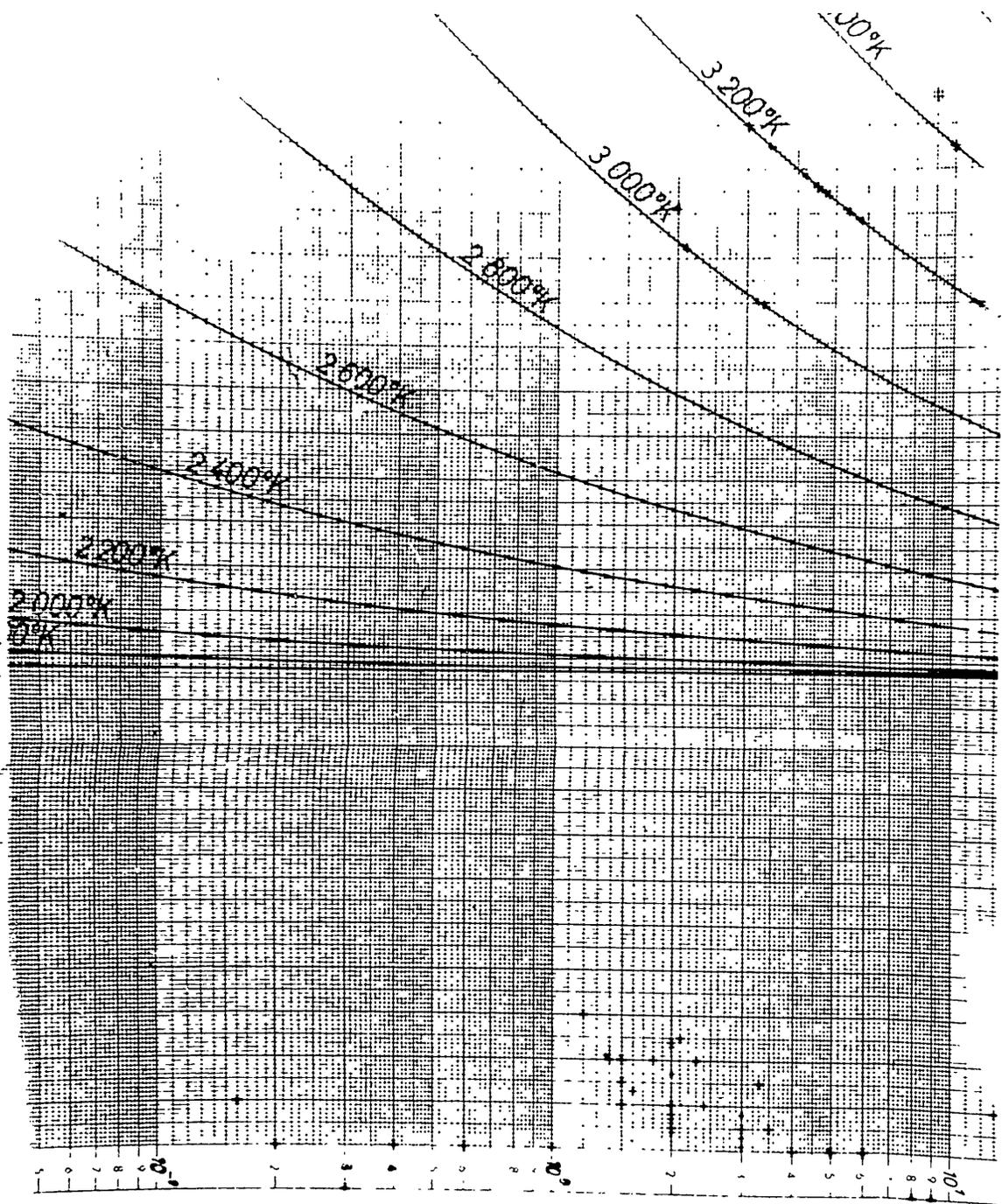
POOR ORIGINAL



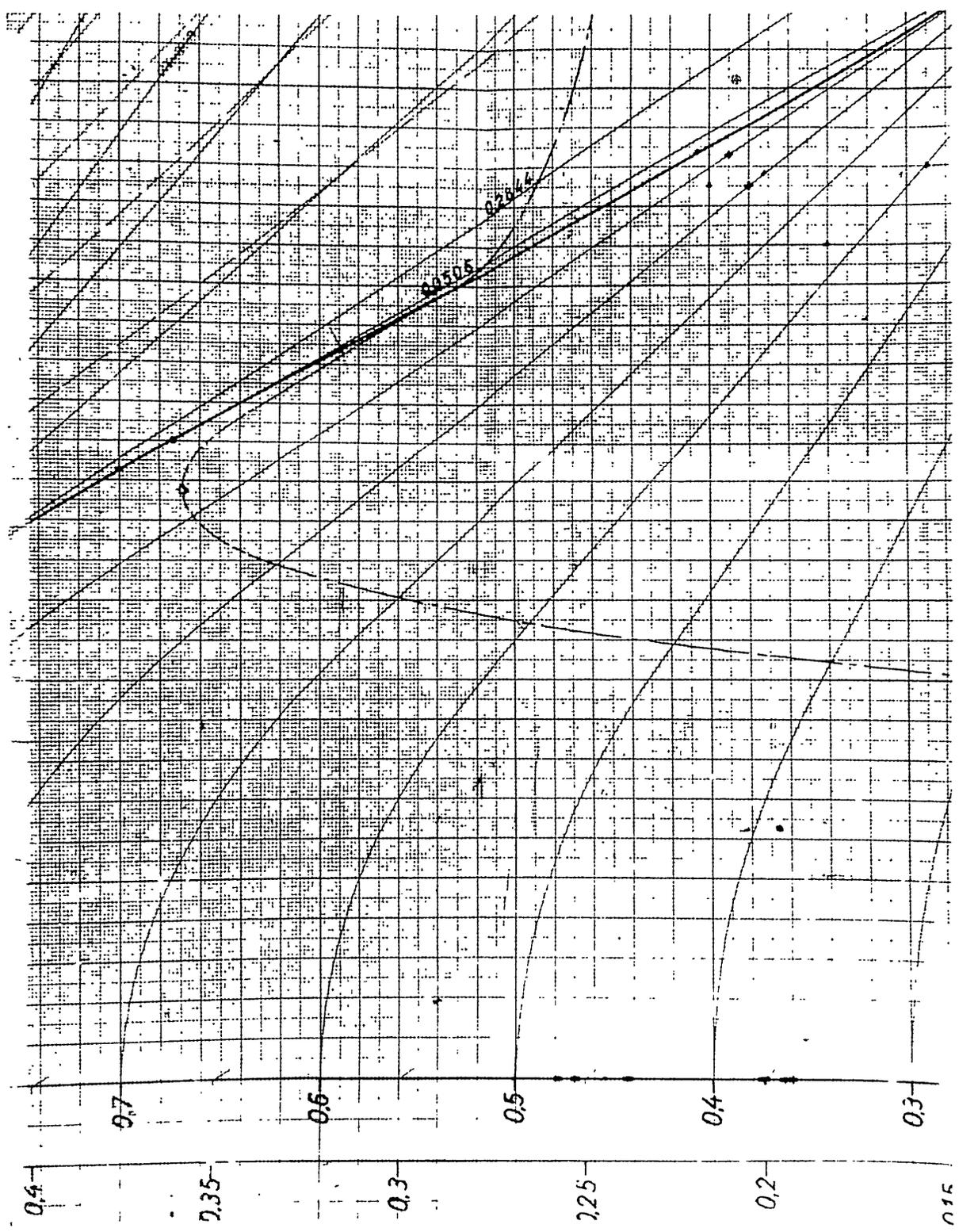
POOR ORIGINAL



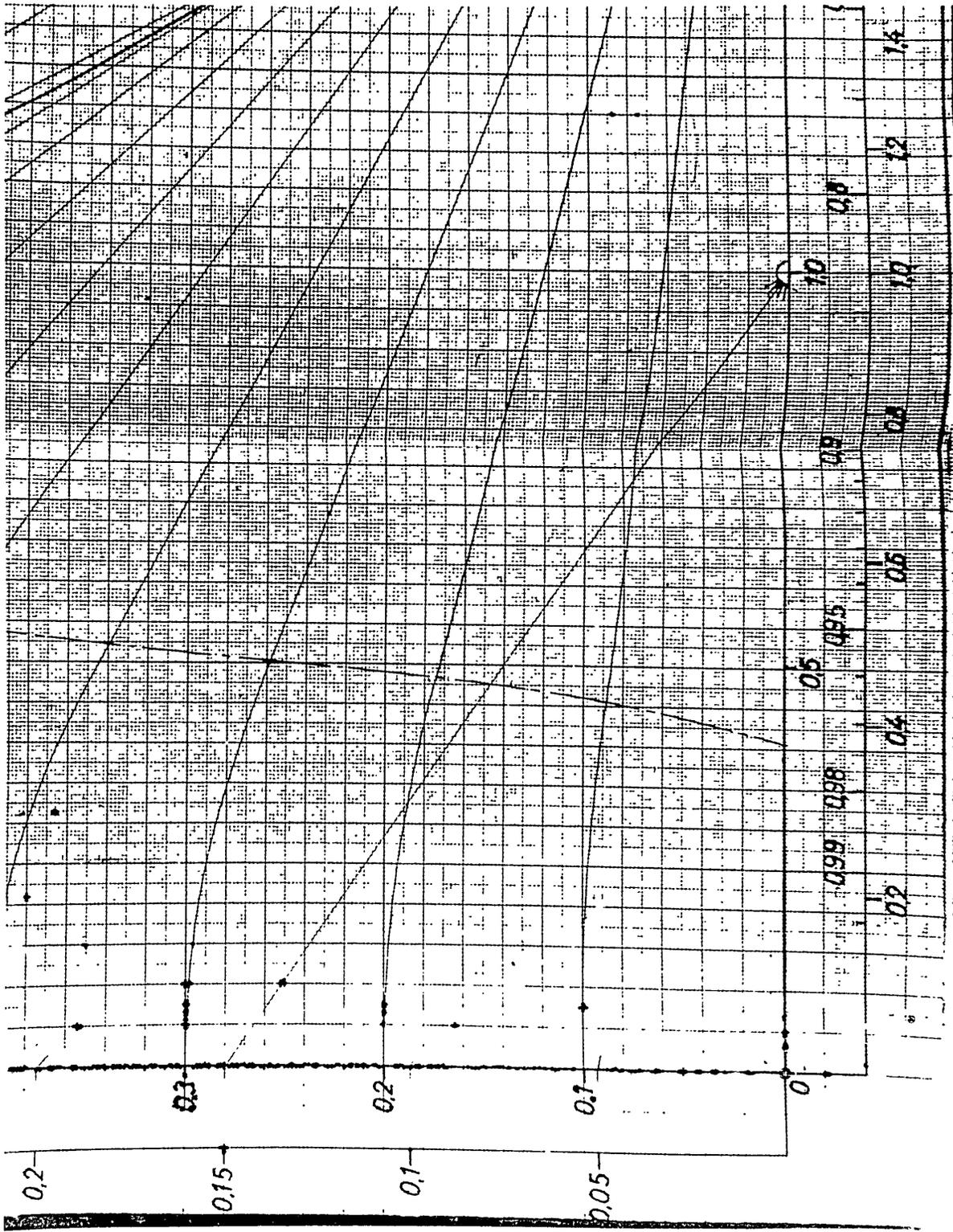
POOR ORIGINAL



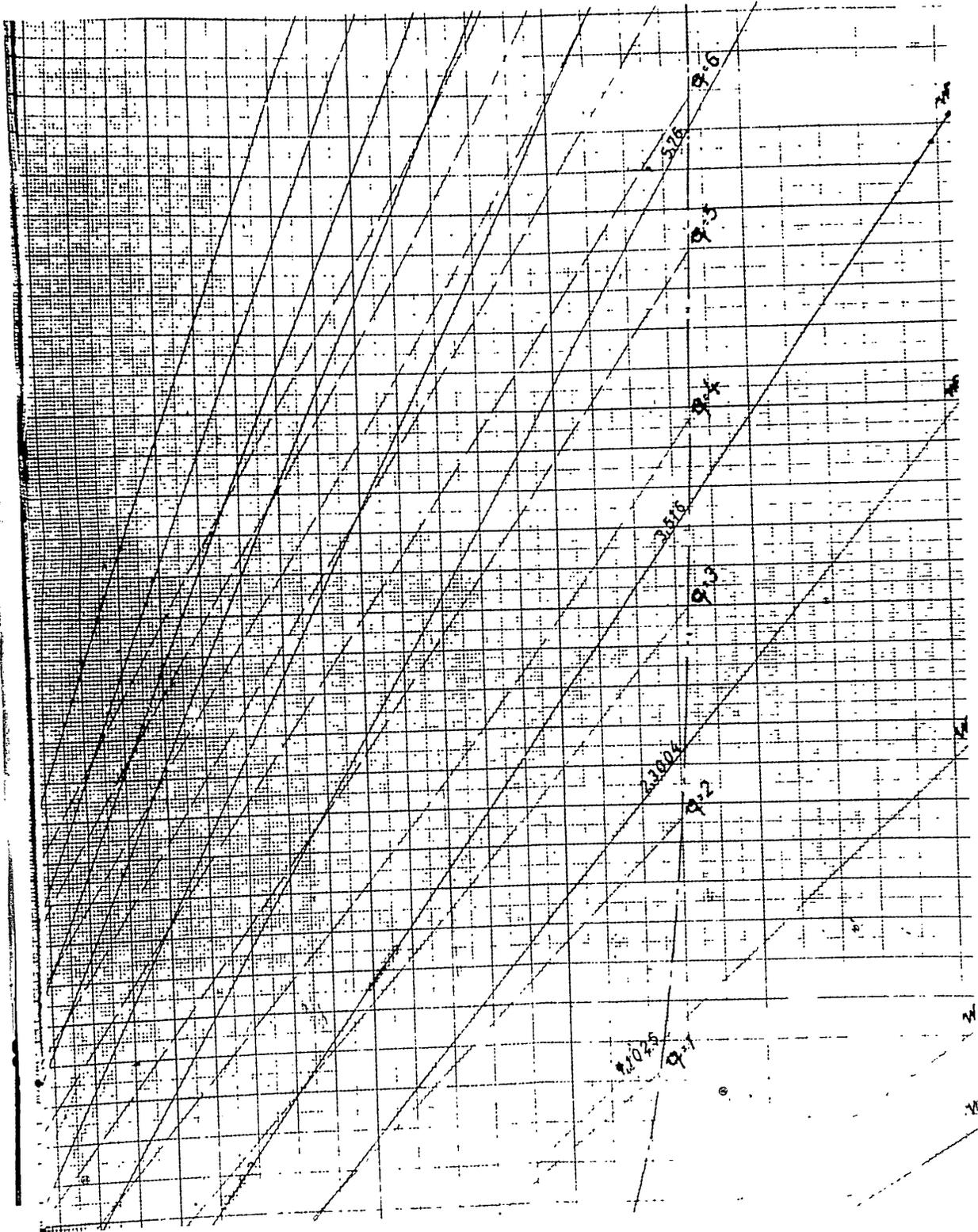
POOR ORIGINAL



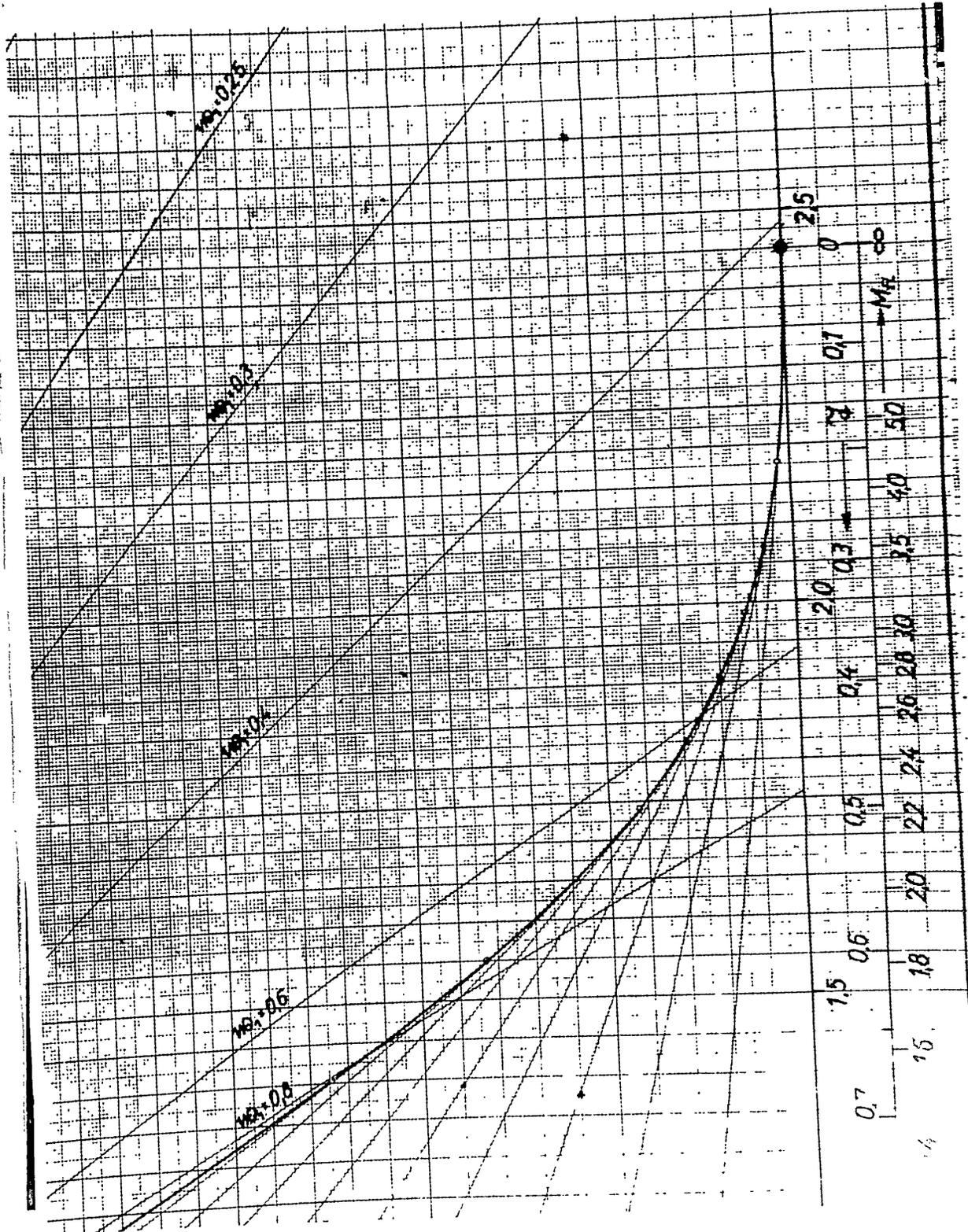
POOR ORIGINAL



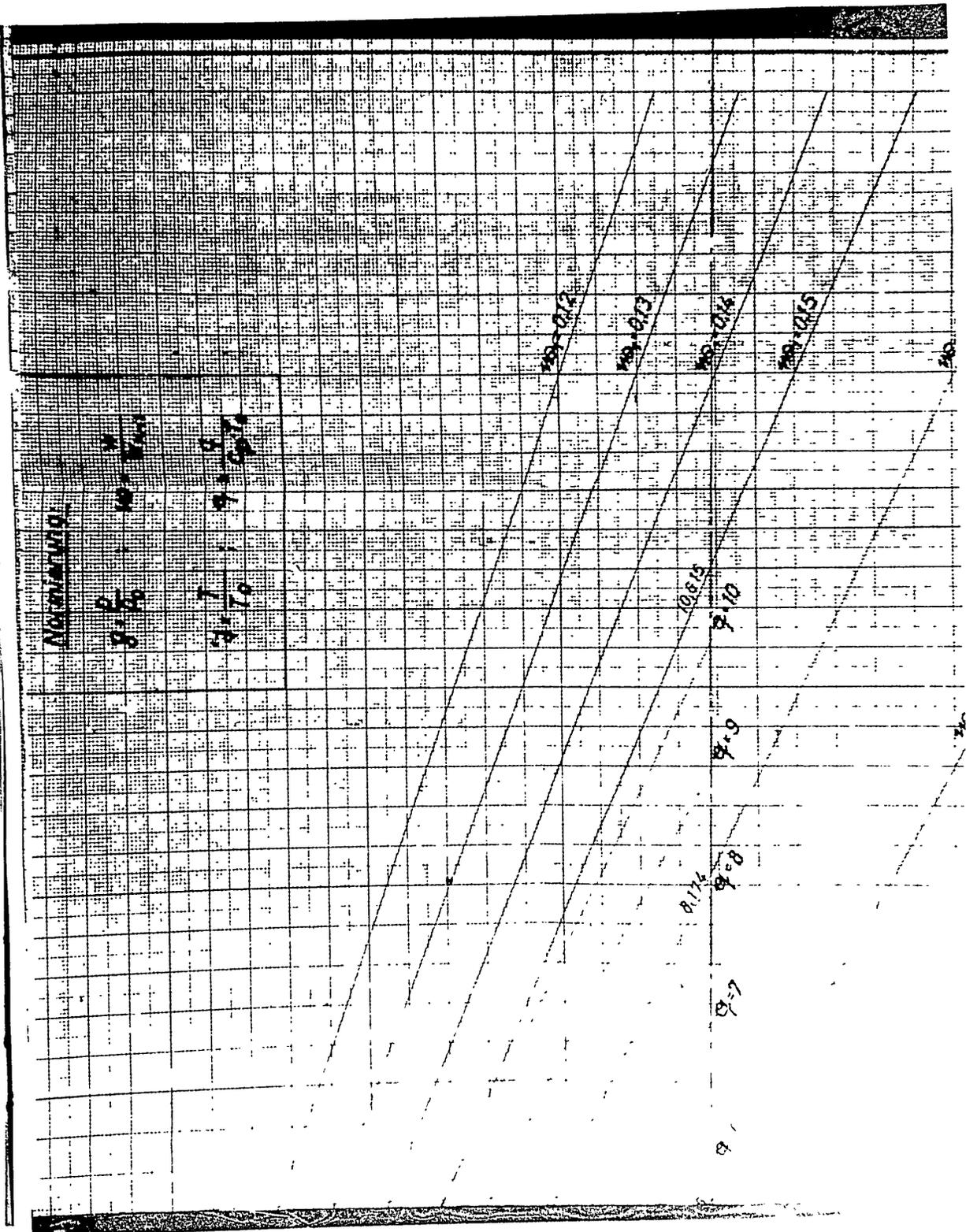
POOR ORIGINAL



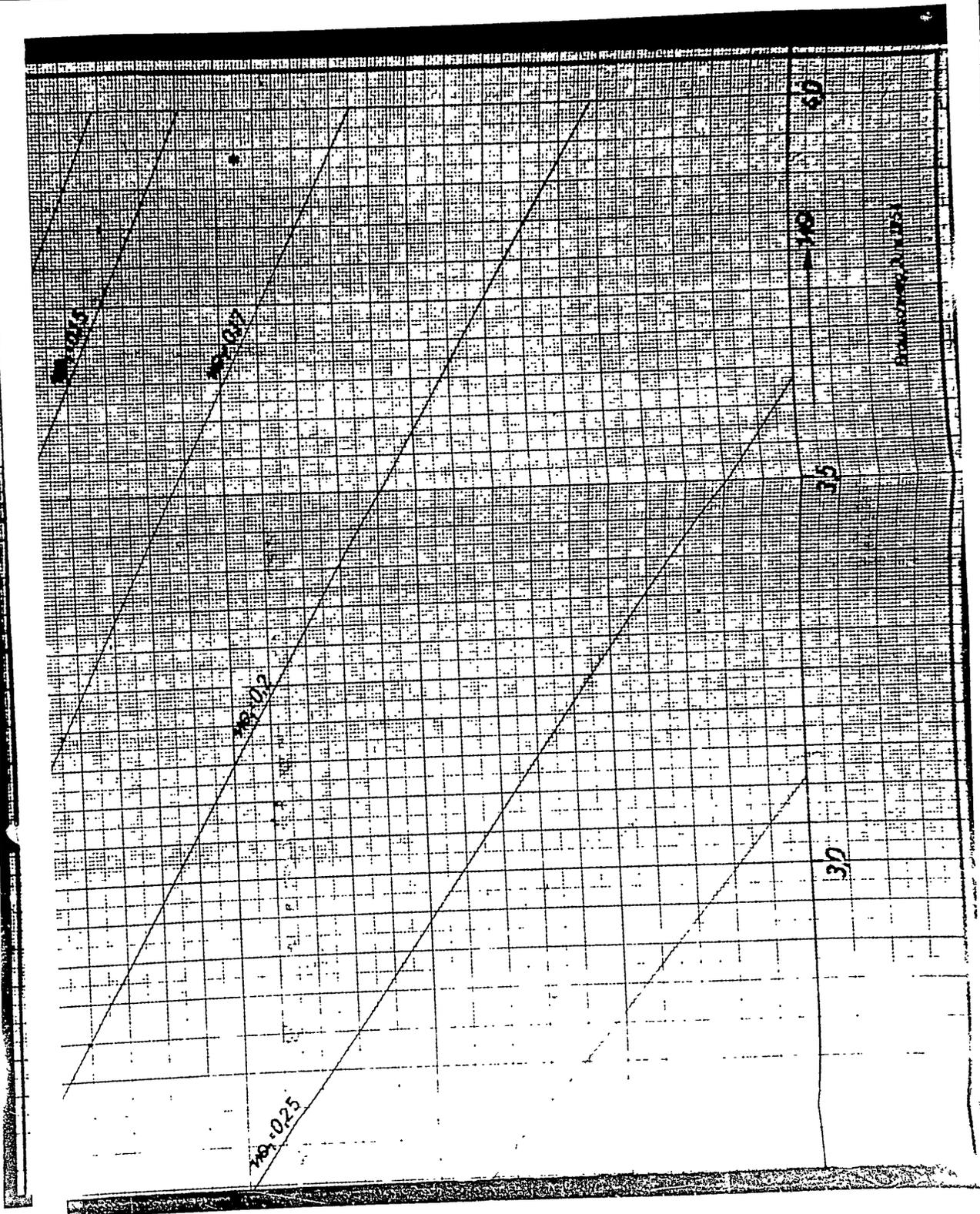
POOR ORIGINAL



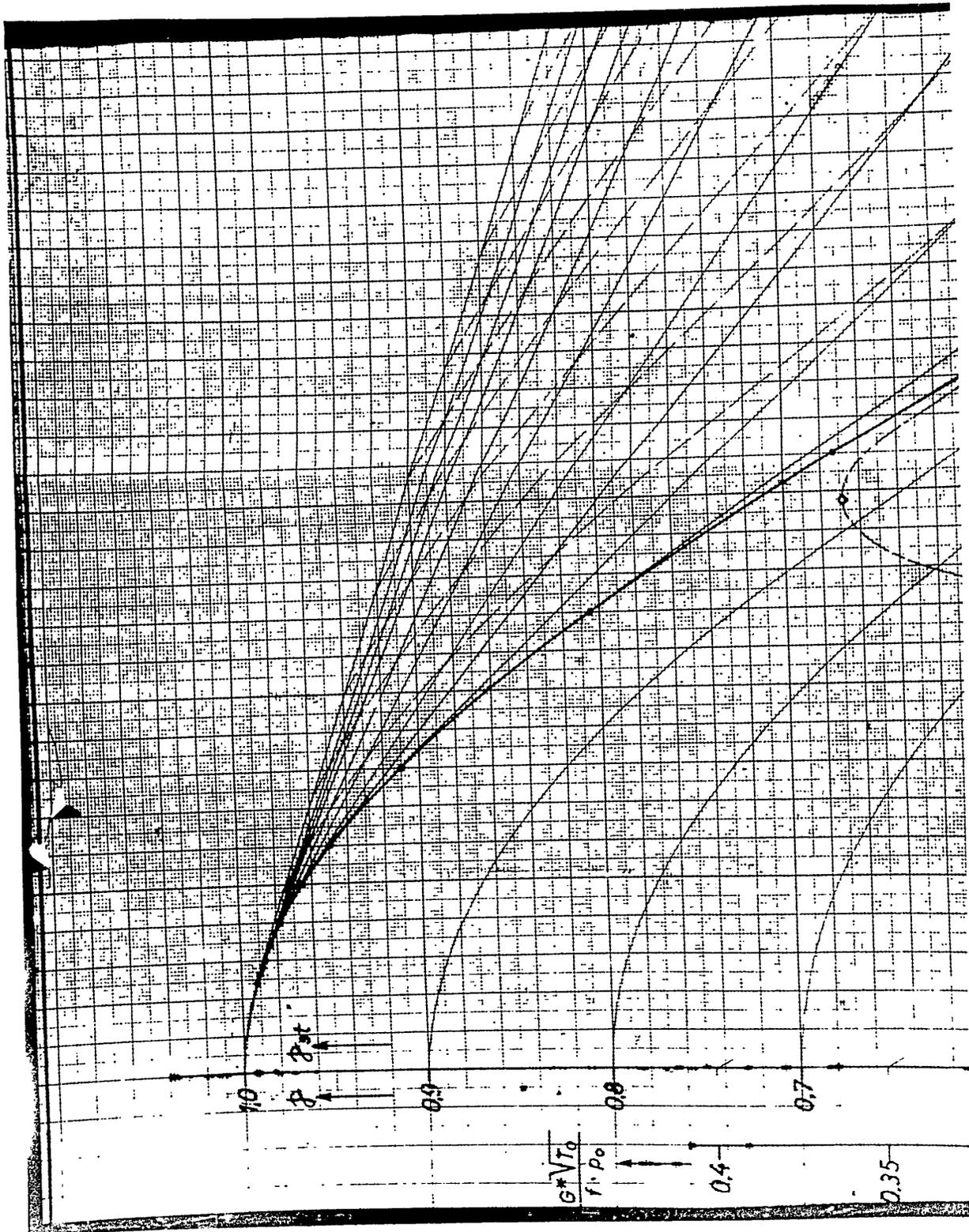
POOR ORIGINAL



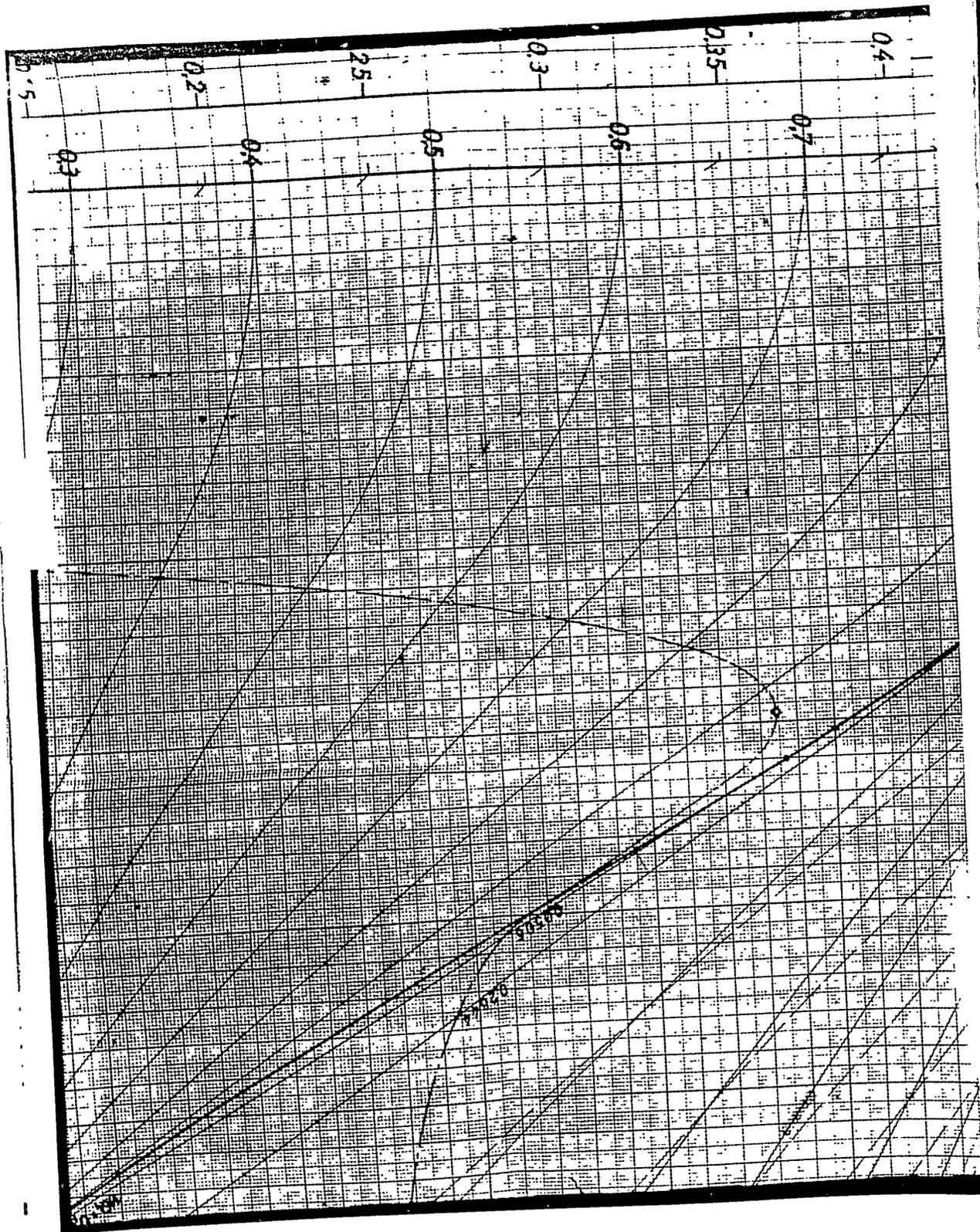
POOR ORIGINAL



POOR ORIGINAL

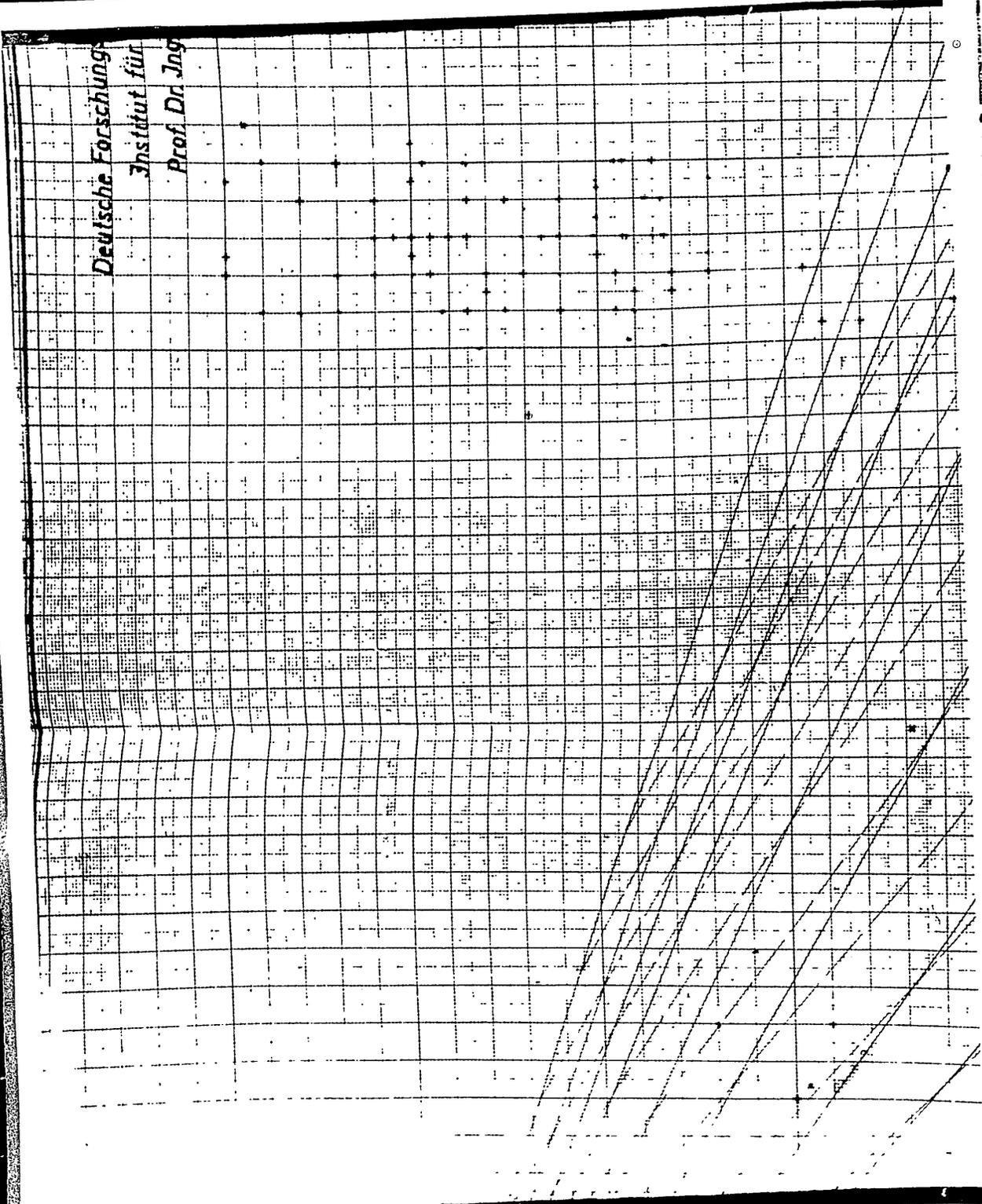


POOR ORIGINAL

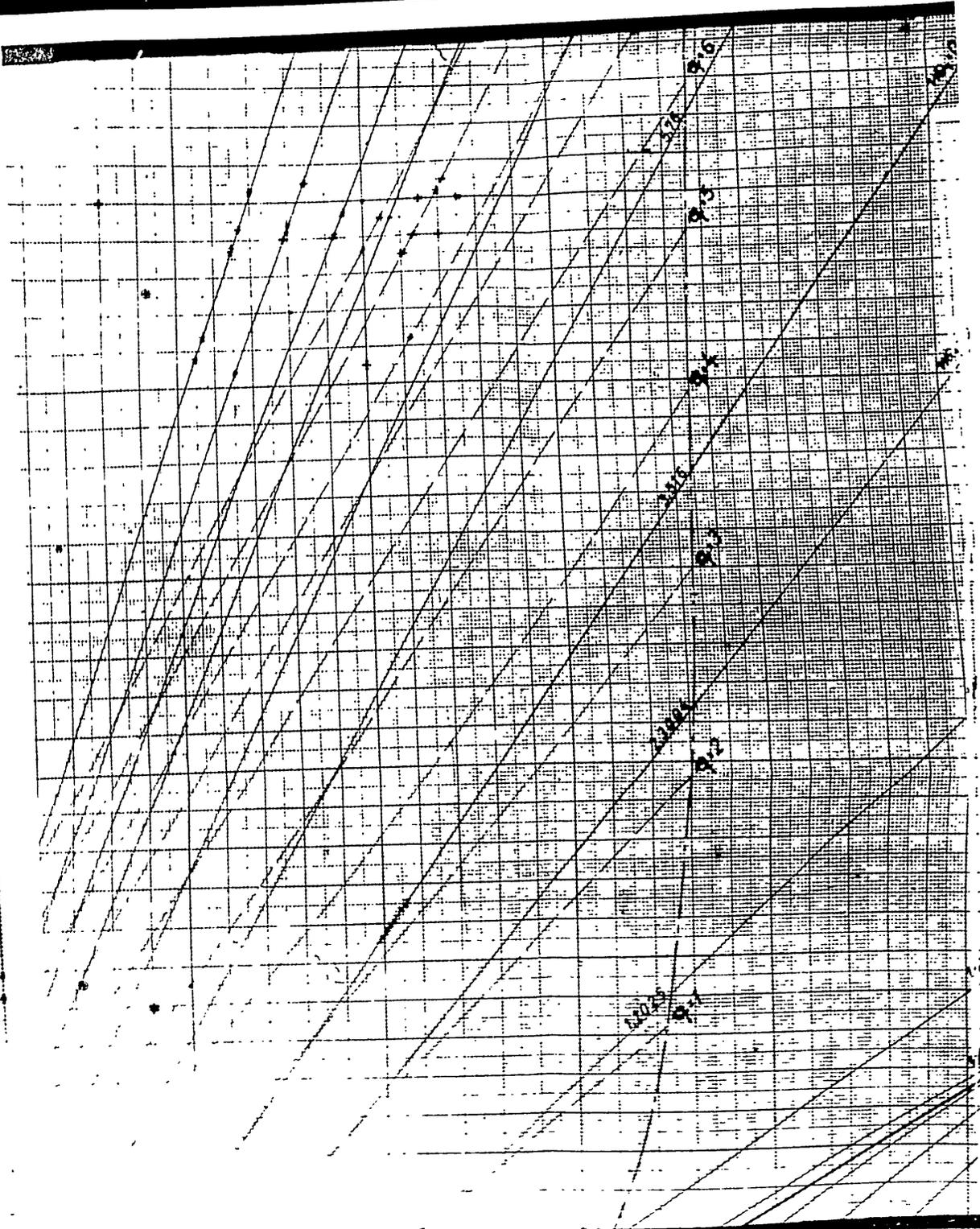


POOR ORIGINAL

Deutsche Forschung
Institut für
Prof. Dr. Ing



POOR ORIGINAL



POOR ORIGINAL

Anlage zu
DFL-Bericht Nr.69
(S 20/57)

Werkstatt für Luftfahrt e.V.
für Strahltriebwerke
Ing. habil. Otto Lutz

8, MO - Diagramm

(2.1.4)

Druck-Geschwindigkeitsdiagramm
in dimensionslosen Koordinaten

Normierung

$$p = \frac{p}{p_0}$$

$$M = \frac{M}{M_0}$$

POOR ORIGINAL

Anlage zu
DFL-Bericht Nr.69
(S 20/57)

Werkstatt für Luftfahrt-FV
r Strahltriebwerke
ing. habil. Otto Lutz

- 8, 10 - Diagramm
(27/4)

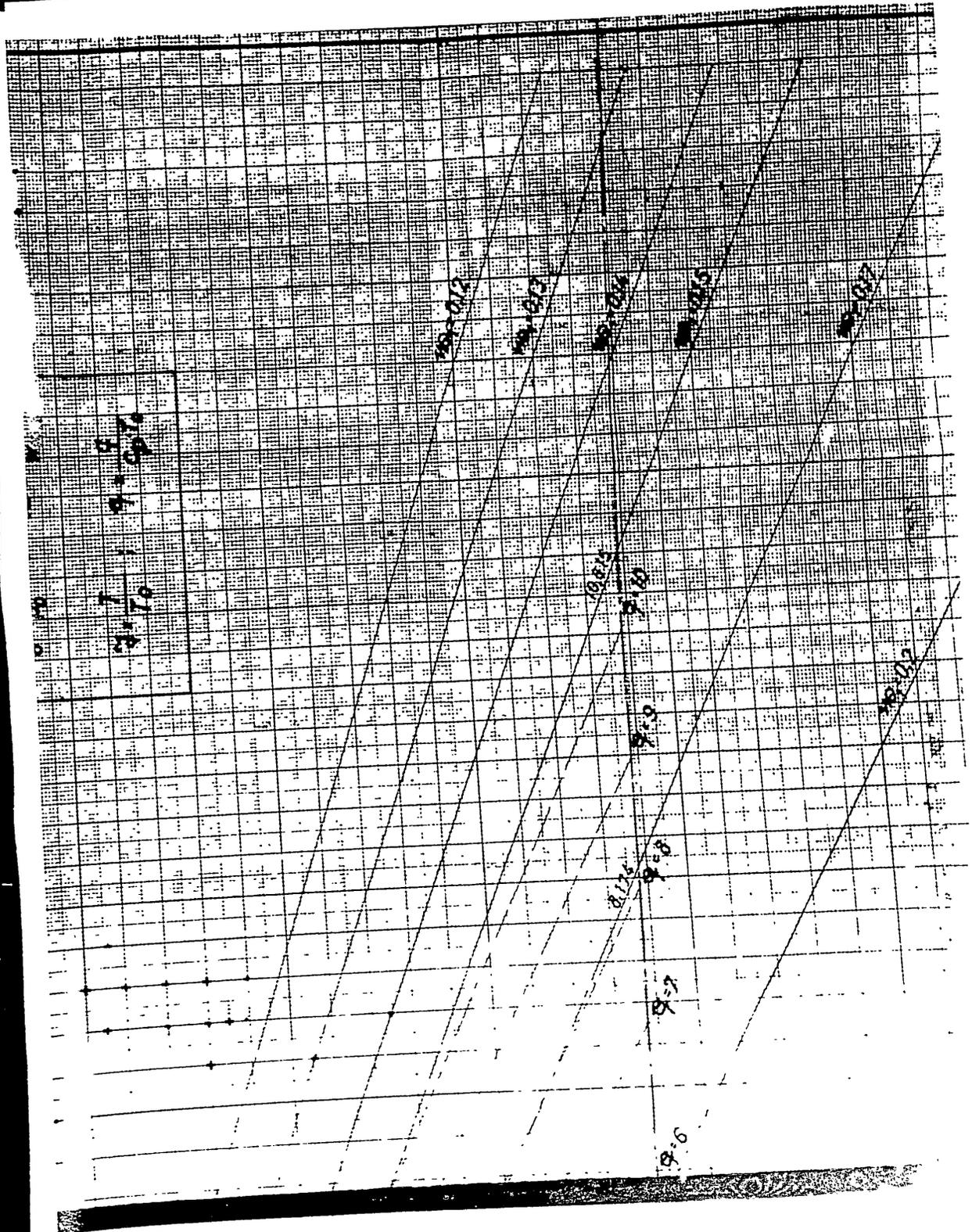
Druck-Geschwindigkeitsdiagramm
in dimensionstosen Koordinaten

Normalung

$$g = \frac{p}{\rho} \quad \text{mit } \rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 1 \quad \text{mit } p = 101325 \text{ Pa}$$

POOR ORIGINAL

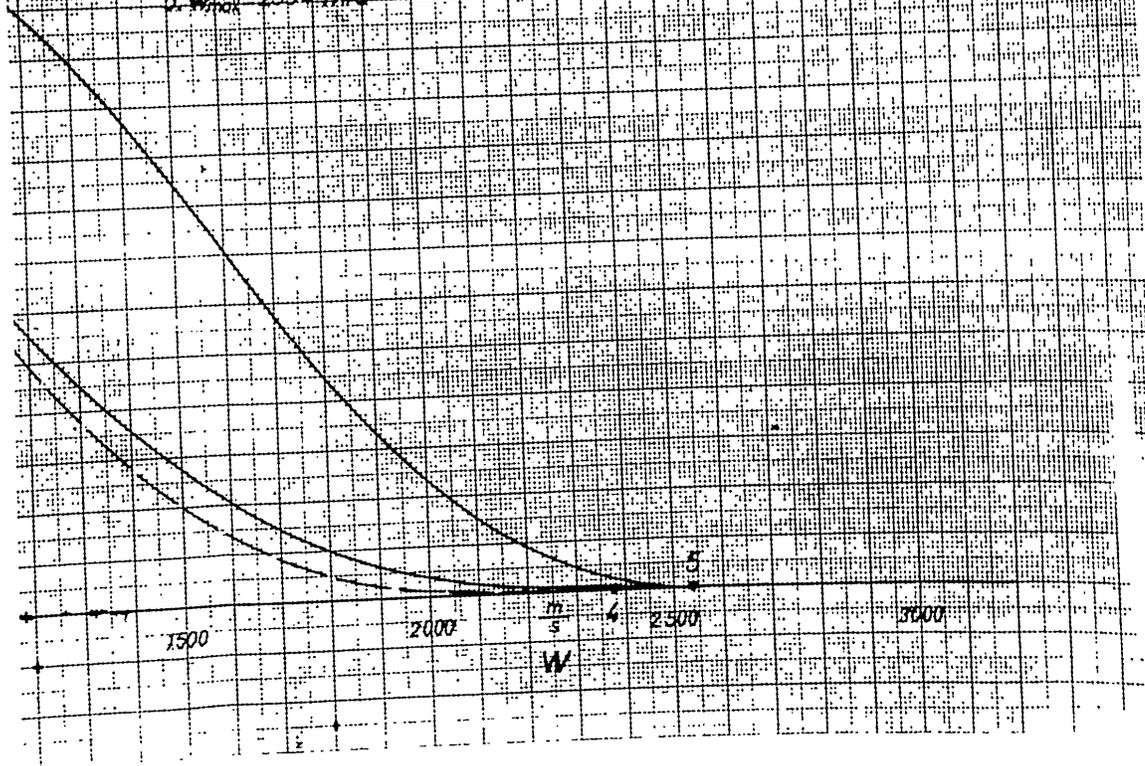


POOR ORIGINAL

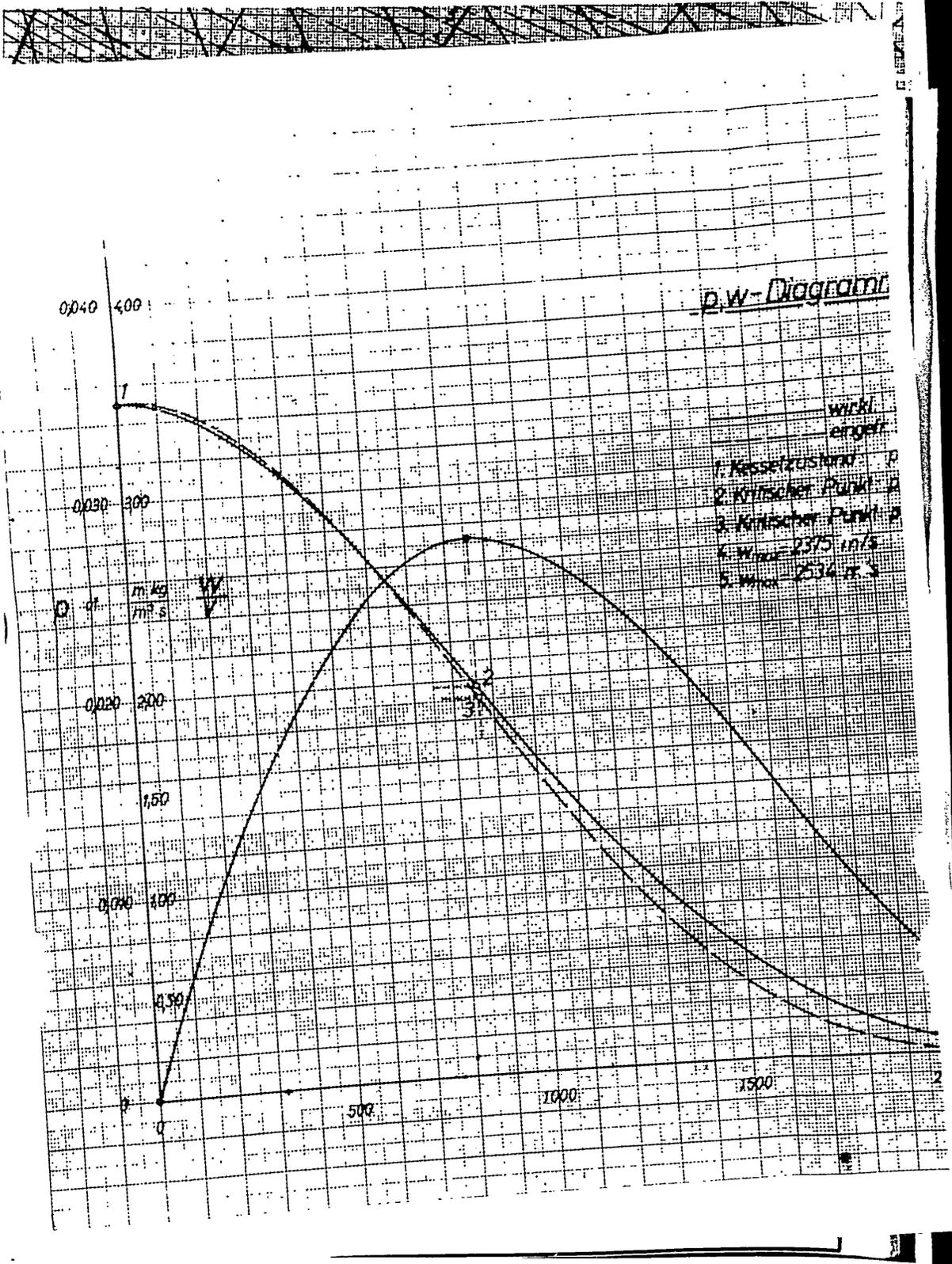
DFL J... S • FB 5 2
 Prof. Dr.-Ing. O. Lutz Diagramm

p,w-Diagramm zu Beispiel 2 (M_{fl} = 2; H = 35 km)

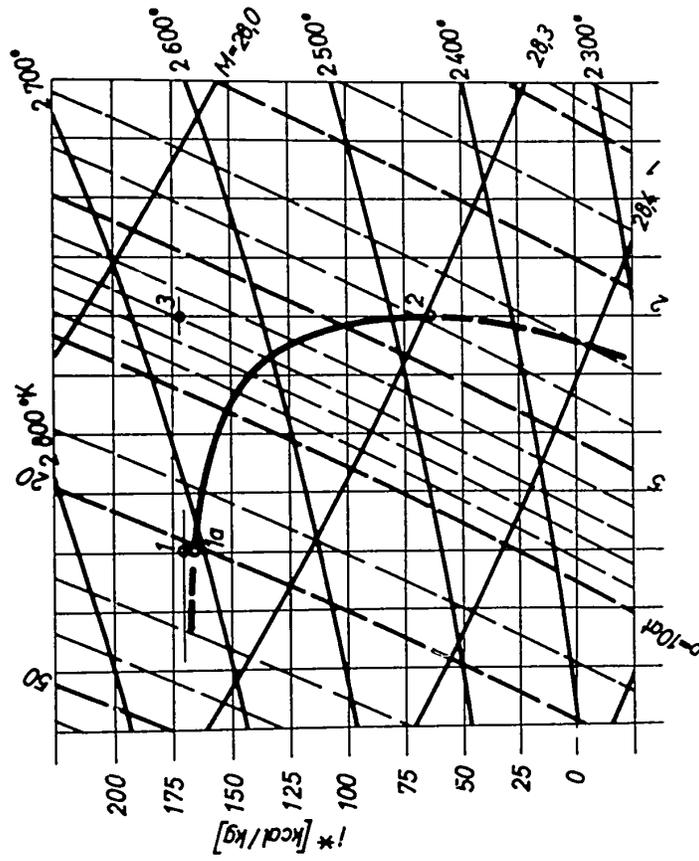
- wirkli. Isentrope
- eingefr. Isentrope
- 1: Kesselzustand: $p_0^* = 0,035 \text{ at}$
- 2: Kritischer Punkt: $p_{kr} = 0,0197 \text{ at}$; $w_{kr} = 860 \text{ m/s}$
- 3: Kritischer Punkt: $p_{kr} = 0,0197 \text{ at}$; $w_{kr} = 861 \text{ m/s}$
- 4: $w_{max} = 2375 \text{ m/s}$
- 5: $w_{max} = 2534 \text{ m/s}$



POOR ORIGINAL

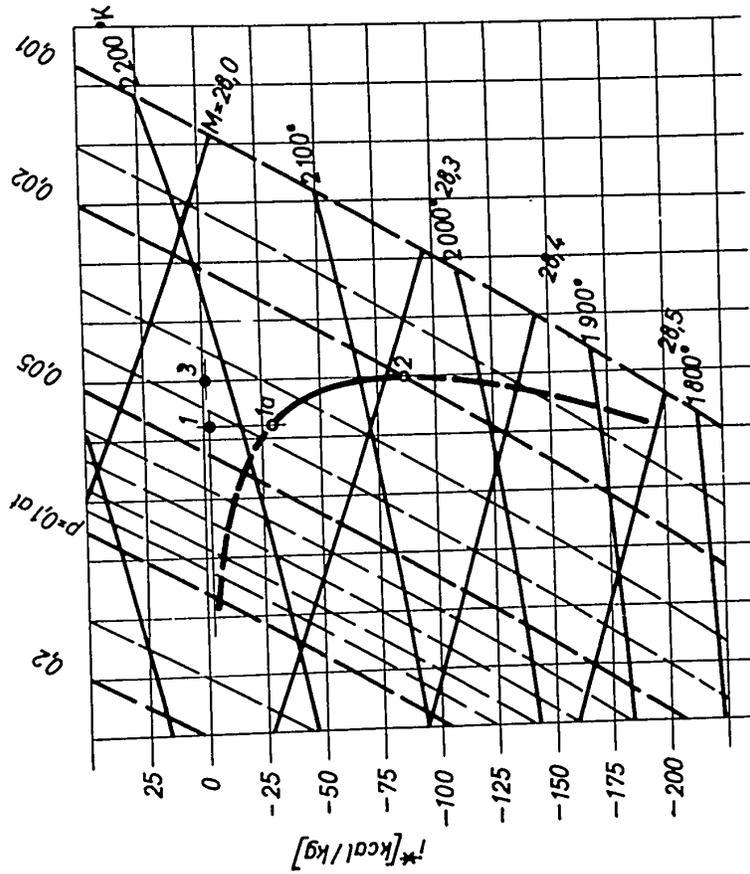


DFL Inst. S FB S 20/57
Prof. Dr.-Ing. O. Lutz Diagramm 8



Verbrennisopleth zum Flugzustand $M=4.0$; $H=0$ km

DFL Inst. S FB S 20/57
Prof. Dr.-Ing. O.Lutz Diagramm 9



Verbrennisopleth zum Flugzustand M=20; H=35 km

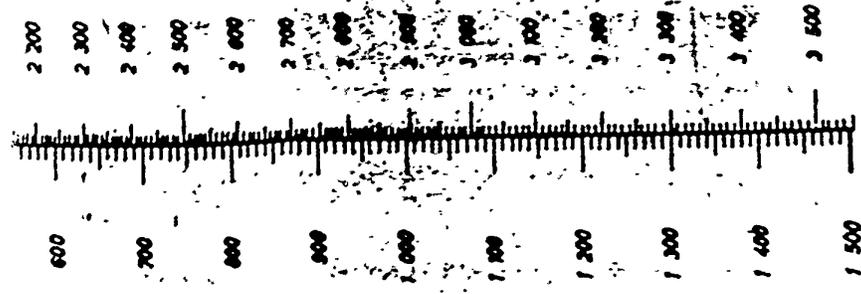
0
2,8

2,7
250

-500
26

Dimensionen:

- Reaktionsenthalpie $i^* \text{ [kcal/kg]}$
- Entropie $s \text{ [kcal/kg grad]}$
- Temperatur $T \text{ [}^\circ\text{K]}$
- Druck $p \text{ [kg/cm}^2\text{]}$
- Molekulargewicht $M \text{ [kg/kmol]}$
- Geschwindigkeit $w \text{ [m/sec]}$

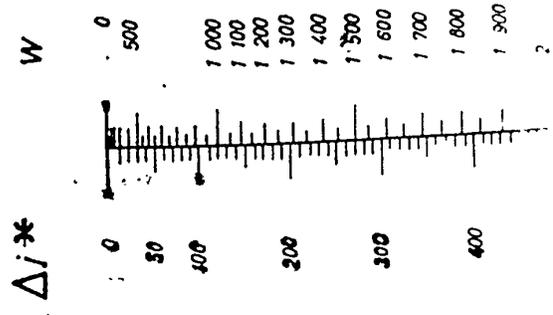
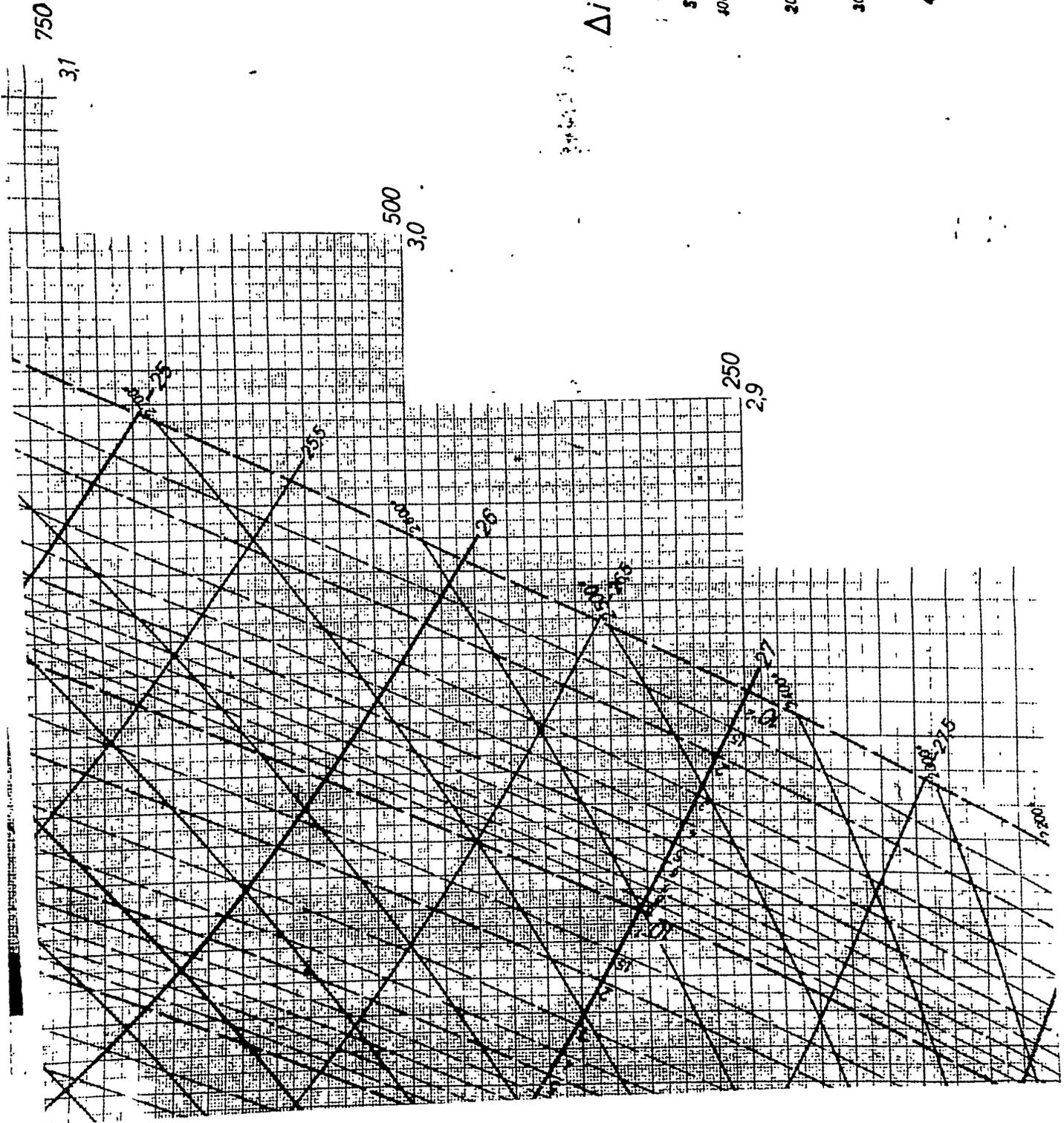


$$w = 91,50 \sqrt{\Delta i^* \text{ [kcal/kg]}} \text{ [m/sec]}$$

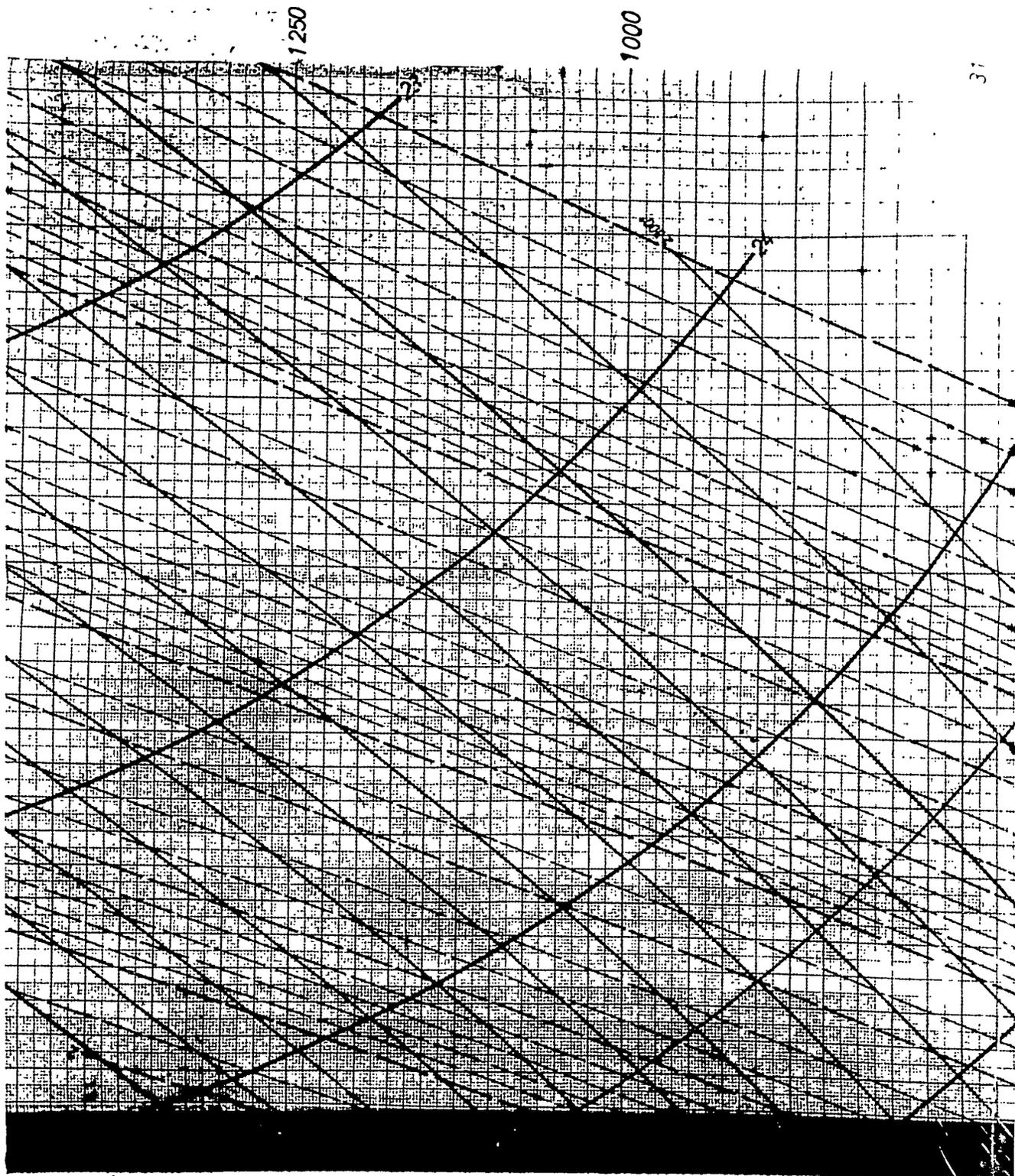
gemessen	23.3.56	4. Juli.	Arbeitsstoff	17.7.55 kg	Braunschweig, den 1. August 1955
geschätzt	15.2.55	1/	gemessen		

2,5

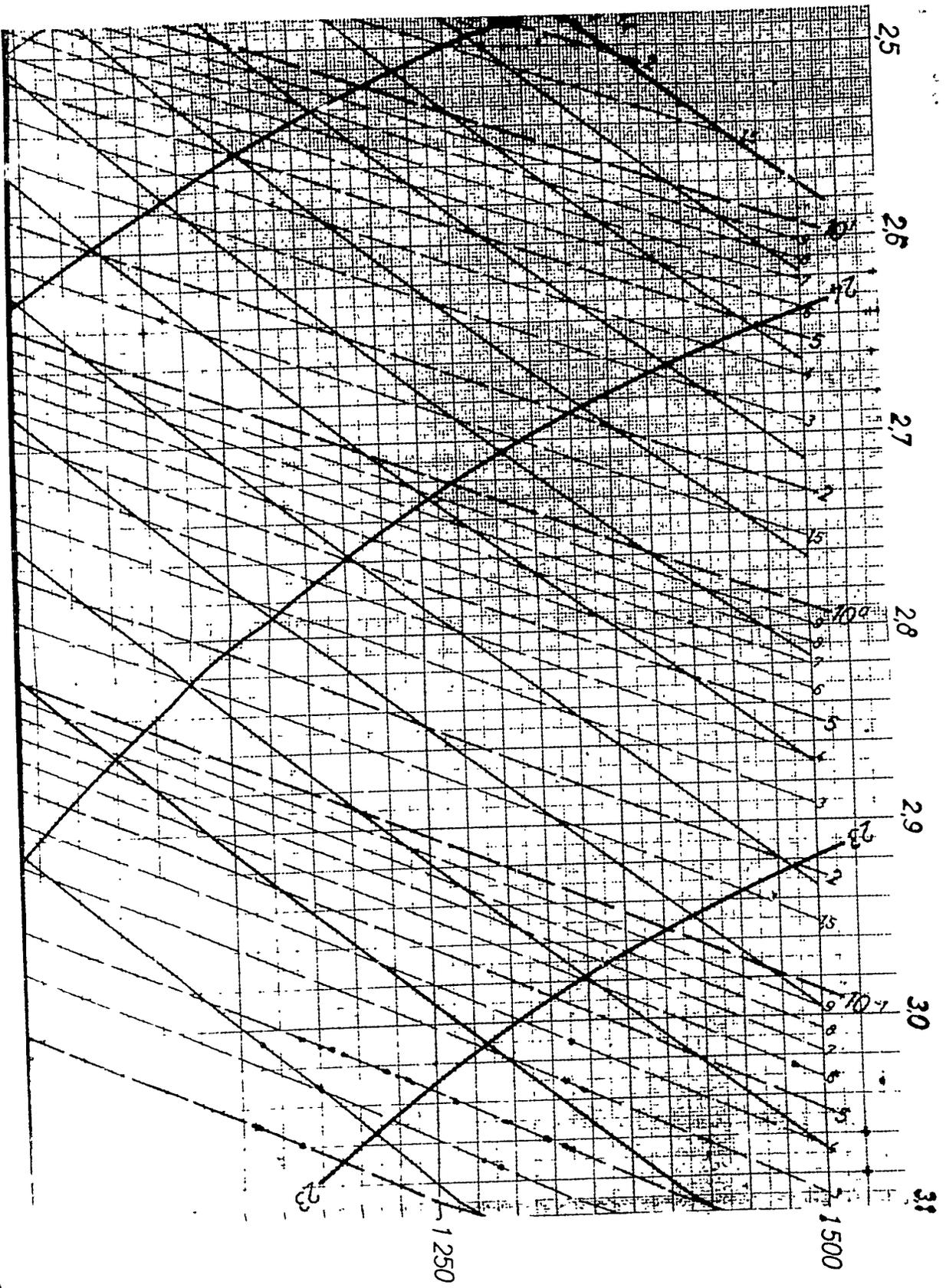
7

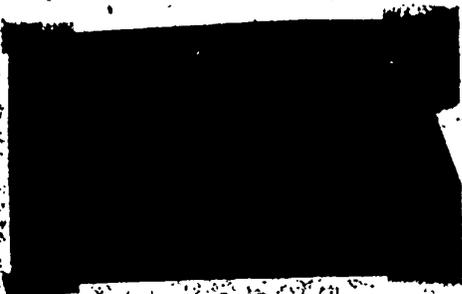


POOR ORIGINAL



POOR ORIGINAL





Forschungsbericht
FB S 20/57
Tafel 4

Deutsche Forschungsanstalt
Institut für Strahltriebwerke
Prof. Dr.-Ing. habil. Ott
Braunschweig

i^*, s -Tafel
(Reaktionsenthalpie - Entropie - Tafel)

für das stöchiometrische Reaktionsgemisch
Heptan-Luft



Temperaturbereich: $T = 1000^\circ K$ bis $T = 4000^\circ K$

• Druckbereich: $p = 10^{-2}$ bis $p = 10^2 \text{ kg/cm}^2$

2,i
1000

POOR ORIGINAL

Forschungsanstalt für Luftfahrt e.V.
Institut für Strahltriebwerke
Prof. Dr.-Ing. habil. Otto Lutz
Braunschweig

- Tafel)

Gasgemisch

+ 41,36 N₂

0°K
n²

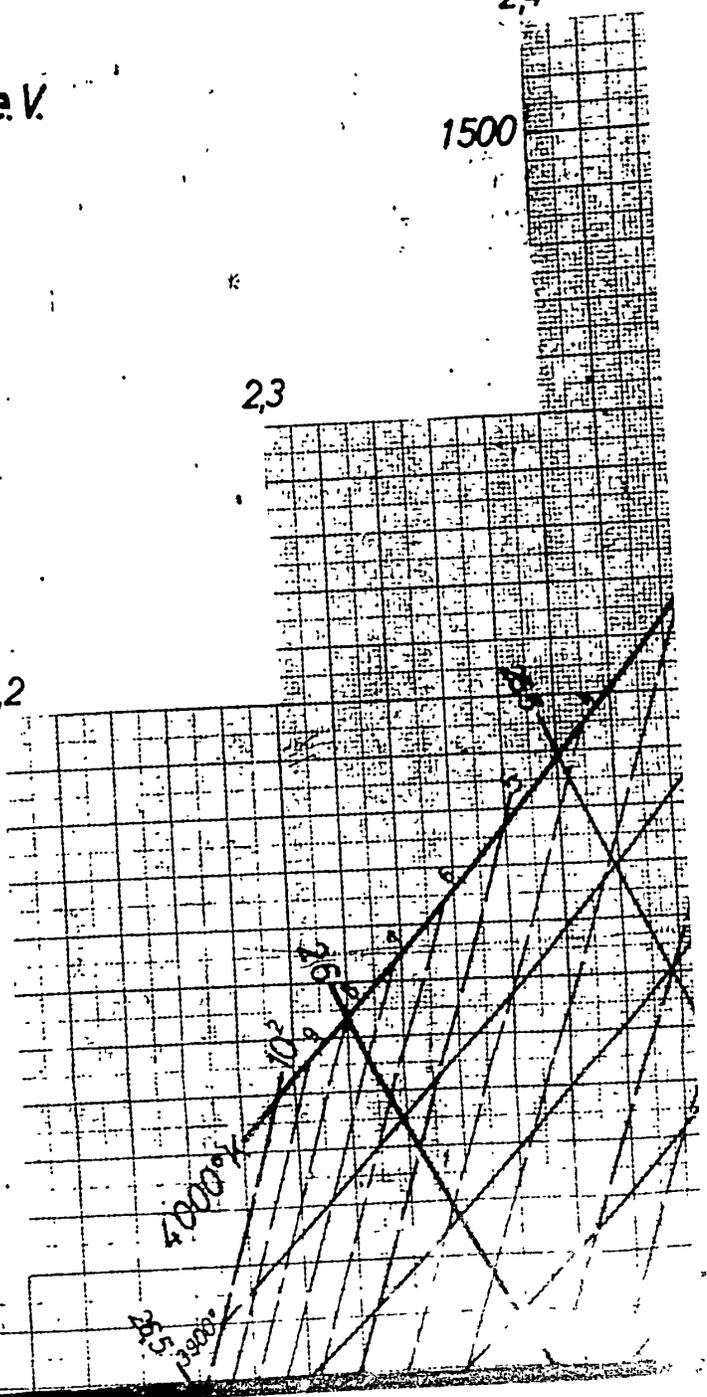
1000 2,1

1250 2,2

2,3

1500

2,4



POOR ORIGINAL

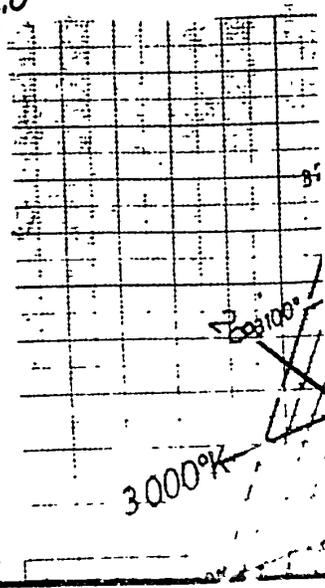
Druckbereich: $p=10^1$ bis $p=10^2$ kg/cm²

2.1
1000

i^* [kcal/kg]

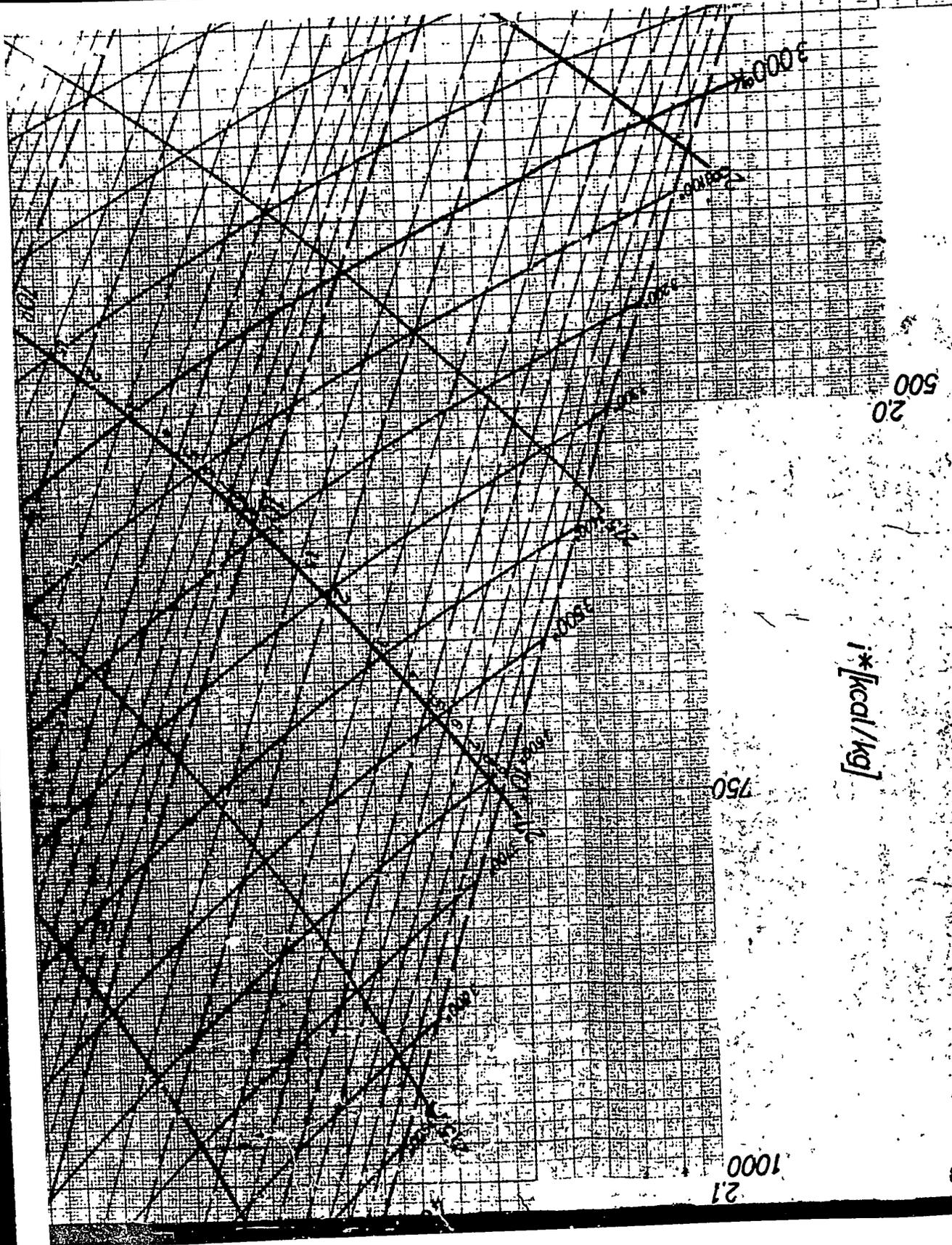
750

2.0
500

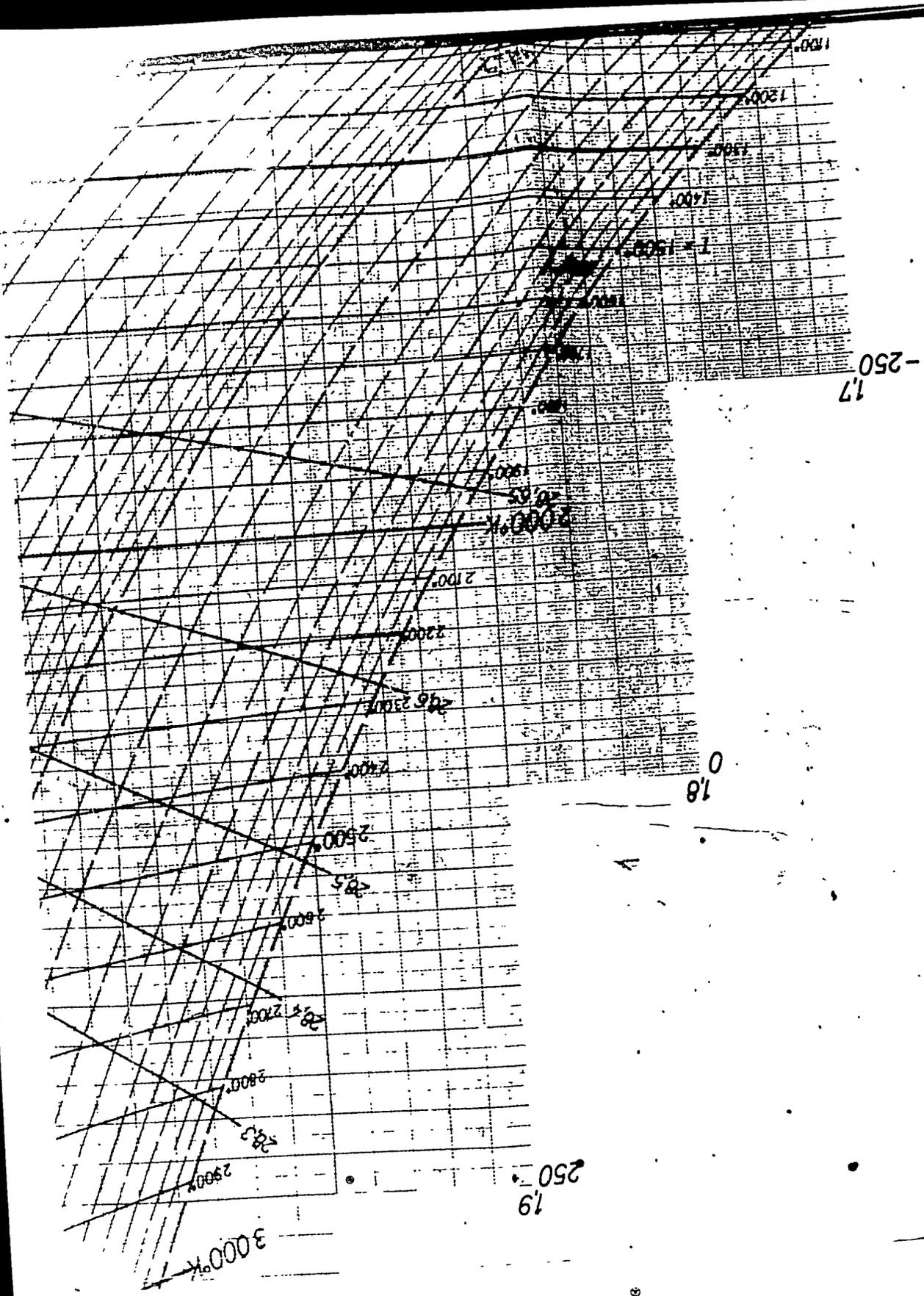


19
250

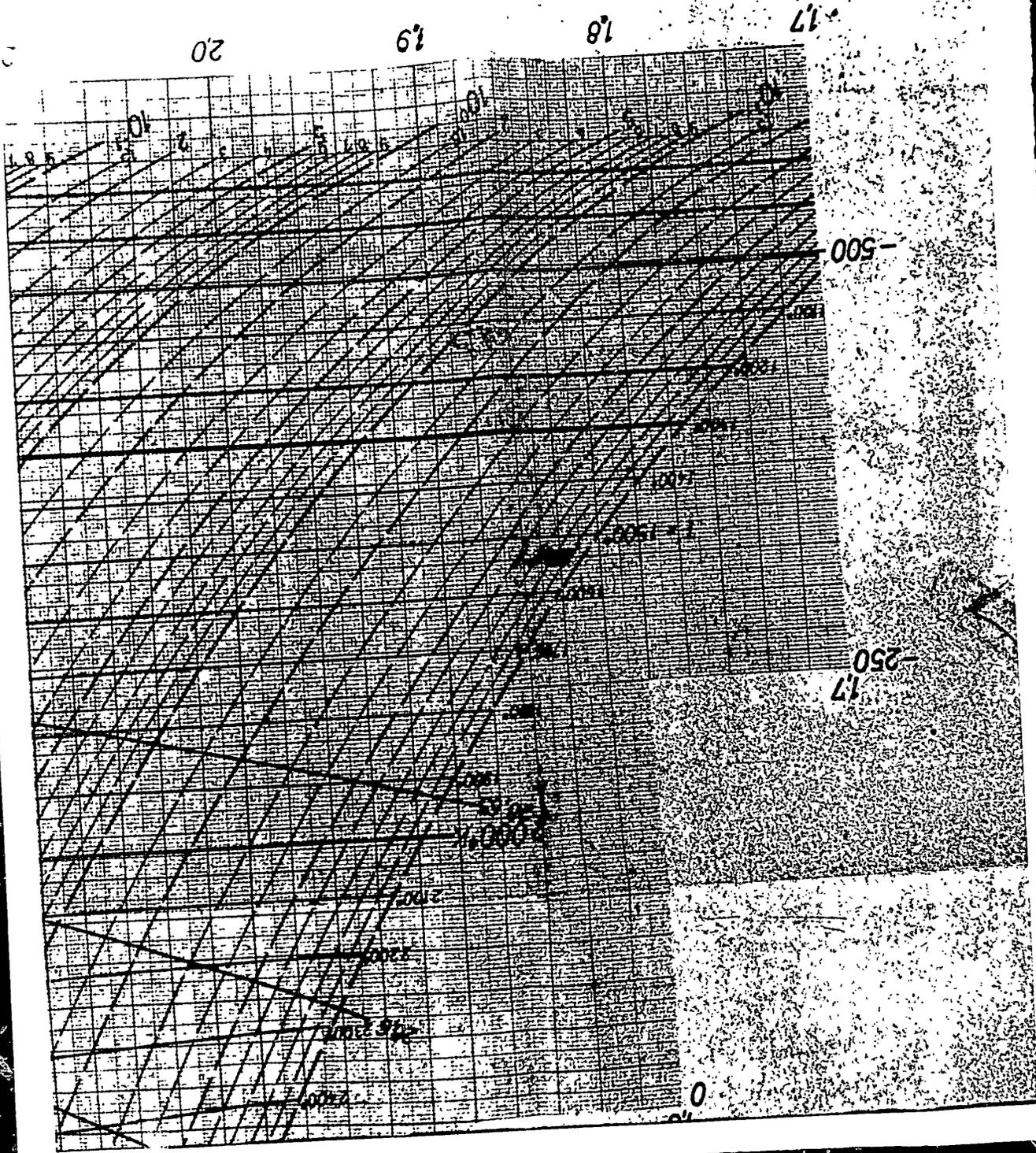
POOR ORIGINAL



POOR ORIGINAL



POOR ORIGINAL



POOR ORIGINAL

S 1001/KG

20
21
22
23
24

